

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

**Návrh konceptu systému SCR
denitrifikace spalin ve variantě „High
Dust“**

Concept of the SCR „High dust“ for Flue
Gas Denitrification:

Student: Bc. Jakub Ostárek

Vedoucí diplomové práce: Ing. Zbyszek Szeliga, Ph.D

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jakub Ostárek**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Návrh konceptu systému SCR denitrifikace spalín ve variantě "High Dust"**
Concept of the SCR "High Dust" for Flue Gas Denitrification

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Navrhnete základní koncept systému SCR denitrifikace spalín ve variantě "High Dust" pro vybraný energetický zdroj spalující fosilní paliva.

Práce bude obsahovat:

Teoretickou, řešební část;

Praktickou část obsahující:

- výpočty relevantních hmotových toků;
- návrh umístění reaktoru ve spalínovém traktu kotle;
- návrh geometrie reaktoru;
- výkresovou dokumentaci jednotky - sestavu.

Seznam doporučené odborné literatury:

BLEJCHAŘ, T.: *Návody do cvičení „Modelování proudění“-CFX*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009 ISBN 978-80-248-2050-7.

ČERNÝ, V. a kol.: *Parní kotle*. Praha: SNTL, 1983.

VEJVODA, J., MACHAČ, P., BURYAN, P.: *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*, VŠCHT Praha, 2003, ISBN: 80-7080-517-X

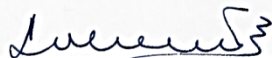
ON 074017 Tepelný výpočet parních kotlů.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zbyszek Szeliga, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018



doc. Ing. Kamil Kolarčík, CSc.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 16.5.2018

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.

- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).

- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO

- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladu, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

- беру на вѣдомі, же оdevздáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 16.5.2018

Jakub Ostárek

Adresa trvalého pobytu autora práce:

plné jméno autora práce

28. října 4. Hlučín 748 01

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Zbyszkovi Szeligovi, Ph.D. za čas, ochotu a cenné rady při vypracování mé diplomové práce.

ANOTACE

Ostárek, J. Návrh konceptu systému SCR denitrifikace spalin ve variantě „High Dust“: diplomová práce. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2018, x s. Diplomová práce, vedoucí Szeliga, Z.

Obsah této diplomové práce zahrnuje popis současných metod, které se používají pro snižování obsahu NO_x ve spalinách. Práce se pak v části praktické zaměřuje na sekundární metody DeNO_x, zadáním práce je selektivní katalytická metoda. Práce obsahuje koncepční návrh technologického celku SCR, tj. bilanční výpočty pro redukční reakce a návrh hlavních rozměrů katalyzátoru a vybraných subtechnologií. V práci je řešen rozvod reagentu do spalin, kde bylo potřeba navrhnout i trubkový výměník pro ohřev vzduchu. V práci byl proveden návrh prvků usměrňujících proudění spalin pro získání optimálního rychlostního pole na vstupu do katalytických vrstev. Výsledkem práce je koncept jednotky SCR ve variantě High Dust pro zadané parametry..

ANNOTATION OF THESIS

Ostárek, J. Concept of the SCR „High dust“ for Flue Gas Denitrification: Thesis Ostrava: VŠB-Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energetics, 2018, x s. Thesis, head: Szeliga. Z

The content of this thesis describes the current methods used to reduce NO_x content in flue gas. The thesis focuses on secondary methods in the practical part, the assignment of work is a selective catalytic method. The thesis contains conceptual design of SCR technology, ie balance calculations for reduction reactions and design of main dimensions of catalyst and selected technologies. In the work is solved the distribution agent in flue gas, where it was necessary to design a tubular heat exchanger for heating the air. The design of the flue gas flow control elements was made in order to obtain an optimal speed field at the entrance to the catalytic layers. The result of this work is the SCR concept of High Dust for the specified parameters.

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	9
Úvod.....	11
1 Základní teoretické poznatky k problematice tvorby emisí oxidu dusíku ze spalovacích procesů	13
1.1 Oxid Dusnatý	13
1.2 Rozdělení a vznik NO _x	13
1.3 Metodika stanovení množství emisí NO _x	15
2 Metody zneškodnění NO _x	16
2.1 Primární opatření	17
2.2 Sekundární opatření	26
2.2.1 Selektivní nekatalytická metoda.....	26
2.2.2 Selektivní katalytická redukce.....	28
3 Návrh základního konceptu technologie SCR v provedení High dust.....	41
4 Stechiometrie spalín	43
5 Návrh základních rozměrů reaktoru	47
Výpočet spotřeby reagentu.....	52
6 Návrh systému přípravy reagentu pro injektáž do spalín.....	55
7 Návrh výměníku tepla vzduch spaliny	58
8 Návrh naváděcích ploch	67
9 Návrh konceptu přípravy a přívodu reagentu.....	71
Závěr.....	72
Zdroje Literatura	73

Seznam použitých symbolů

Aspec	Specifický povrch katalyzátoru	$[m^2 \cdot m^{-3}]$
ASR	skutečný stechiometrický poměr	$[-]$
D	vnější průměr	$[m]$
EA	aktivační energie	$[kJ \cdot mol^{-1}]$
M	molární hmotnost	$[kg \cdot kmol^{-1}]$
Pr	Prandtlovo číslo	$[-]$
Q	teplo	$[kW]$
Q	tepelný výkon	$[MW]$
Qi	výhřevnost	$[MJ \cdot kg^{-1}]$
Pr	Prandtlovo číslo	$[-]$
Re	Reynoldsovo číslo	$[-]$
S	průtočný průřez	$[m^2]$
SR	stechiometrický molární poměr	$[-]$
\dot{V}	objemový tok	$[m^3 N \cdot s^{-1}]$
c	koncentrace	$[mg \cdot m^{-3} N]$
cp	měrná tepelná kapacita za stálého tlaku	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
d	vnitřní průměr	$[m]$
de	ekvivalentní průměr	$[m]$
h	výška	$[m]$
k	součinitel prostupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
l	délka	$[m]$
\dot{m}	hmotnostní tok	$[kg \cdot s^{-1}]$
n	přebytek vzduchu	$[-]$
\dot{n}	molární tok	$[mol \cdot s^{-1}]$
p	tlak	$[Pa]$
t	teplota	$[^{\circ}C]$
v	rychlost	$[m \cdot s^{-1}]$
w	rychlost	$[m \cdot s^{-1}]$
x	objemový podíl	$[ppm]$
l	tepelná vodivost	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
r	hustota	$[kg \cdot m^{-3} N]$
α	součinitel přestupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$

η	účinnost	[-]
ν	kinematická viskozita	[m ² · s ⁻¹]
ν	vlhkost vzduchu	[-]

Horní indexy

r	surový stav
S	suchý
V	vlhký

Dolní indexy

celk	celkový
ef	efektivní podmínky
EL	emisní limit
kat	katalyzátor
leck	leakage

Úvod

Redukce emisí z energetických zdrojů spalujících fosilní paliva ale i z dalších zdrojů znečištění ovzduší je velmi aktuální, a to s ohledem na vyplývající z emisí znečišťujících látek do ovzduší environmentální zátěž, kterou je nutno minimalizovat. Lze vidět celosvětový trend, společenský požadavek na snižování emisí.

Pro zdroje spalující fosilní paliva v ČR je pak zřejmý dlouhodobý trend snižování emisních limitů, a to především v posledních desetiletích, který již přinesl značnou redukci zátěže pro životní prostředí. V nejbližší budoucnosti pak dojde k dalšímu snížení emisních limitů, a to dle nařízení Evropské Unie vcházející z BAT AEL. Tyto nové emisní limity pak vejdou v platnost v roce 2021. Přijetí rozhodnutí o závěrech o BAT Komisí (Q2-4/2017) bylo učiněno 4 a 5. 6. 2017, pak 31. 7. 2017 schváleny Evropskou komisí a závěry o BAT pro Velká spalovací zařízení, pak vydány ve věstníku EU, 17. 8. 2017 zveřejněno implementační rozhodnutí Evropské komise o závěrech o BAT pro velká spalovací zařízení.

Následuje čtyřletá lhůta pro uvedení integrovaných povolení stávajících zařízení do souladu s požadavky rozhodnutí komise, dle harmonogramu přezkumů integrovaných povolení zveřejňovaných MŽP.

Ve své práci se zabývám návrhem technologie SCR ve variantě High Dust redukce NO_x pro spaliny z energetického zdroje, jež spaluje černé uhlí.

Tab. č. 1 Budoucí emisní limity NO_x „Final Meeting of the Technical Working Group for the review of the BAT reference document for Large Combustion Plants”

Spalovací zařízení o celkovém sumárním jmenovitém tepelném příkonu (MW _t)	NO _x , roční průměr (mg/Nm ³)		NO _x , denní průměr (mg/Nm ³)	
	nový zdroj	stávající zdroj ⁽¹⁾	nový zdroj	stávající zdroj ⁽⁵⁾
<100	100 - 150	100 - 270	155 - 200	165 - 330
100 - 300	50 - 100	100 - 180	80 - 130	155 - 210
>300 fluidní kotel - černé a hnědé uhlí práškový kotel - hnědé uhlí	50 - 85	85 - 150 ⁽⁴⁾	80 - 125	140 - 165
>300 práškový kotel - černé uhlí	65 - 85	65 - 150	80 - 125	85 – 165 ^{(2) (3)}

(1) Uvedený emisní limit neplatí pro zdroje fungující méně jak 1500 h/rok

(2) V případě, že je zařízení uvedeno do provozu nejpozději do 7. ledna 2014 nebo provozováno více jak 1500 h/rok platí emisní limit 200 mg/Nm^3 , a 220 mg/Nm^3 v případě, že je zdroj provozovaný méně jak 1500 hodin/rok.

(3) V případě, že je zařízení uvedeno do provozu nejpozději do 1. července 1987 a jsou provozovány méně jak 1500 hodin za rok a není použitelná technologie SNCR nebo SCR platí emisní limit 340 mg/Nm^3 .

(4) Nižší hodnota emisního limitu platí v případě využití SCR

(5) Uvedené emisní limity jsou orientační pro zdroje, které jsou v provozu více jak 500 h/rok.

(6) V případě, že je zařízení uvedeno do provozu nejpozději do 7. ledna 2014 pro FBC a pro PK spalující hnědé uhlí platí vyšší hodnoty uvedeného rozmezí, která je 175 mg/Nm^3 .

(7) V případě, že je zařízení uvedeno do provozu nejpozději do 7. ledna 2014 pro FBC a pro PK spalující hnědé uhlí platí vyšší hodnoty uvedeného rozmezí, která je 220 mg/Nm^3 .

[1]

1 Základní teoretické poznatky k problematice tvorby emisí oxidu dusíku ze spalovacích procesů

Na úvod své práce bych rád ve zkratce uvedl něco o oxidech dusíku tzv. NO_x , jak vznikají, jaké mají vlastnosti a jak je možné je odstranit nebo alespoň částečně redukovat. Při spalování paliv vzniká díky reakci kyslíku s dusíkem především oxid dusnatý (NO) zhruba z 90 %, pak oxid dusičitý (NO_2) z 10% a oxid dusný (N_2O), který však neřadíme do skupiny emisí, které hromadně označujeme zkratkou NO_x .

1.1 Oxid Dusnatý

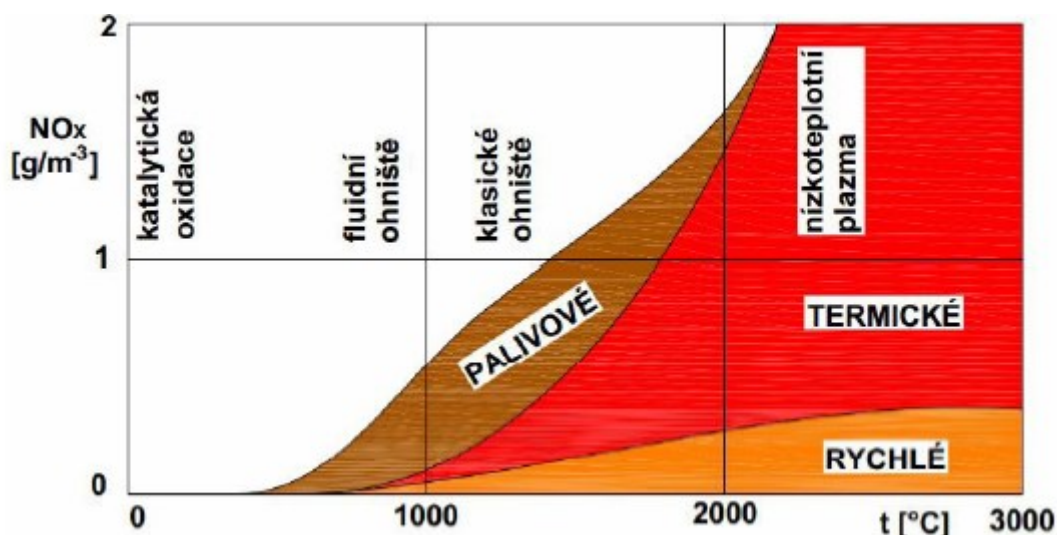
NO je bezbarvý vysoce toxický plyn, který však plní důležité chemické signální funkce u lidí či zvířat, a má tedy různé aplikace v lékařství. Oxid dusnatý se zkapalní na $-151,8\text{ }^\circ\text{C}$ a tuhne při $-163,6\text{ }^\circ\text{C}$. Tento plyn je téměř nerozpustný ve vodě. Rychle reaguje s kyslíkem a vytváří pak oxid dusičitý. Oxid dusnatý je poměrně nestabilní, může ztratit nebo získat jeden elektron a vytvoří pak ionty NO^- nebo NO^+ . V chemickém průmyslu je oxid dusnatý mezistupeň látky, která vniká během oxidace čpavku na kyselinu dusičnou. [2]Oxid dusičitý

NO_2 je zapáchající tmavě hnědý plyn silně jedovatý s příznačným zápachem. U člověka může způsobit akumulaci tekutiny v plicích což je známo jako plicní edém. Oxid dusičitý také reaguje v atmosféře za vzniku kyseliny dusičné, což přispívá k problému kyselého deště. Oxid dusičitý navíc hraje roli při tvorbě fotochemického smog, který se vyskytuje v mnoha městských oblastech. NO_2 je silné oxidační činidlo v průmyslových procesech. Kapalný oxid dusičitý se využívá jako okysličovadlo v raketových motorech, nejčastěji v kombinaci s hydrazinem jako palivem. Směs hydrazinu s oxidem dusičitým začne reagovat automaticky po smíchání těchto dvou složek. Proto při použití této směsi jsou raketové motory jednodušší, neboť nepotřebují zážehový systém. [3]

1.2 Rozdělení a vznik NO_x

Ke vzniku oxidů dusíku vedou reakce, které potřebují vysokou teplotu pro jejich uskutečnění. Dělíme je do 3 skupin jako palivové, termické a tzv. rychlé NO_x . Na obrázku č. 1 můžeme vidět závislost množství vytvořených NO_x na teplotě.

Obr. č. 1: Tvorba NO_x v závislosti na teplotě



[4]

Termické

Vysokoteplotní (termické) NO_x vznikají díky oxidační reakci dusíku od teploty okolo 1200 °C. Rychlost vzniku závisí na reakční době při dané teplotě. Jeho množství roste exponenciálně se zvyšující se teplotou. Reakce, které vedou ke vzniku termické NO_x, nazýváme radikálové, díky tomu že reagují s jedním či více nepárovými elektrony, které nazýváme radikály. V rovnici č. 1 a 2 a 3 jsou radikály značeny tečkou. [5]

Termické NO_x vznikají reakcemi, které závisí na typu prostředí:

a) Přebytek O₂



b) Přebytek paliva



V rovnici č. 4 popisují tvorbu vysokoteplotních NO_x podle Zeldovičova mechanismus:

$$NO = k_1 \cdot e^{\frac{-k_2}{T}} \cdot C_{N_2} \cdot \sqrt{C_{O_2}} \cdot t \text{ [mg/m}_N^3] \quad (4)$$

Kde:

k₁, k₂ - jsou konstanty [1]

T - teplota [K]

t - doba trvání reakčních podmínek [s]

C_{N_2} – koncentrace dusíku [%]

C_{O_2} – koncentrace kyslíku [%]

Z rovnice č. 4 vyplývá, že tvorba NO_x je závislá na délce reakce, obsahu kyslíku a dusíku a na teplotě

Palivové NO_x

Palivové oxidy dusíku vznikají z dusíku, který je vázaný na dusíkaté sloučeniny v palivu především tuhém ale i v některých kapalných palivech. Obsah dusíku vázaného v palivu je maximálně do 2 % hm., obsah se různí podle typu paliva. Podíl dusíku, který se přemění přecházením do spalin ve formě NO_x a celkový obsah dusíku se nazývá konverzní poměr „ v “. Konverzní poměr je vyjádřený v rovnici č. 5:

$$v = \frac{A}{B} < 1 \quad (5)$$

Kde:

A – N v palivu přeměněný na NO

B – N v palivu organický vázaný

[5]

Rychlé NO_x

Rychlé (promptní) NO_x vznikají na okraji plamene, kde oxiduje molekulární dusík za účasti uhlovodíkových radikálů. Tvorba těchto NO_x je závislá na teplotě a především na přebytku vzduchu. Promptní NO_x vznikají podle Fenimore mechanismu. V průmyslu jsou rychlé NO_x zanedbatelné, ve větší míře vznikají až při teplotě vyšší než 2000 °C. [5]

1.3 Metodika stanovení množství emisí NO_x

Do skupiny NO_x , počítáme, dle současné emisní legislativy, NO a NO_2 . Koncentrace se měří pomocí disperzní ultrafialové fotometrie, jedna ze složek je v určeném konvertoru konvertována, následně pro získání hodnoty v mg/m^3 se naměřené hodnoty násobí hustotou NO_2 pro stanovení koncentrace v mg/m^3 spalin. Po změření se výsledky porovnávají s emisními limity, kde je nutno respektovat referenční stav. Z důvodu oxidace NO na NO_2 v kouřové vlečce, výsledek přepočtený na NO_2 reálně popisuje stav a charakter znečištění ovzduší.

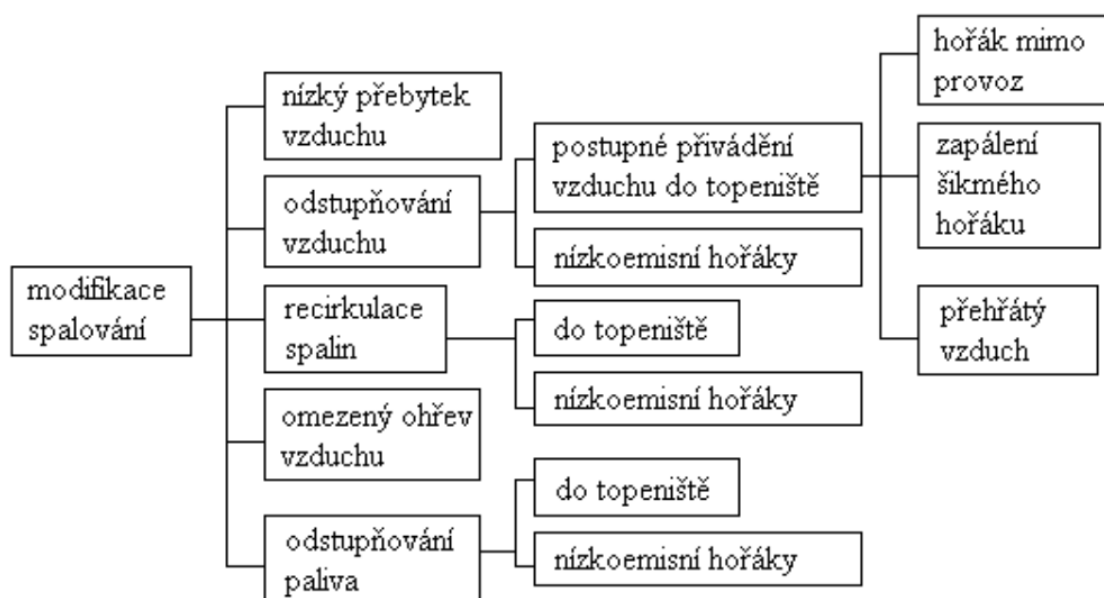
2 Metody zneškodnění NO_x

Existují dvě základní skupiny, do kterých lze rozdělit techniky na snížení emisí oxidu dusíku. První skupina jsou tzv. primární opatření, která pomocí řízení spalovacího procesu zajišťují minimalizaci tvorby oxidu dusíku. Druhá skupina se snaží snižovat emise oxidu dusíku již ve vzniklých spalínách, nazýváme je sekundární opatření. [6]

Primární opatření

Primární opatření upravují spalovací proces za účelem potlačit samotný vznik oxidu dusíku. Tato opatření slouží k úpravě provozu nebo projektových parametrů spalovacích zařízení. Přehled primárních opatření je zobrazen na obrázku č. 2.

Obr. č.2 – Přehled primárních opatření ke snižování emisí NO_x



[7]

Sekundární opatření

Sekundární techniky se soustřeďují na čištění vzniklých spalin od oxidu dusíku. Mezi dvě hlavní metody, které se dnes hojně využívají, patří selektivní katalytická redukce (SCR) a selektivní nekatalytická redukce (SNCR). Obě tyto metody fungují na principu přimíchávání čpavku, močoviny a obdobných sloučenin do spalin, kde reagují s oxidy dusíku a redukují je na molekulární dusík. V těchto metodách se vyskytují reakce za přítomnosti kyslíku. Tyto reakce jsou popsány v rovnicích č. 5,6,7,8,9. [8]



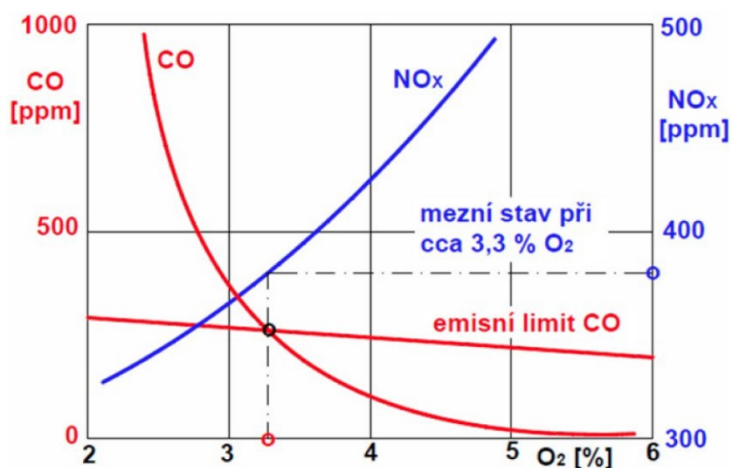
2.1 Primární opatření

Vznik NO_x při spalování závisí především na teplotě a také na koncentraci kyslíku. Cílem by mělo tedy být, zaopatřit snížení teplotního maxima a pokusit se o co největší snížení koncentrace O_2 v oblastech vysokých teplot, avšak nezhoršit kvalitu a stabilitu hoření. Primární opatření mají také své rizika. Mezi největší patří možné zvýšení chemického nedopalu a nebo snížení účinnosti celého spalovacího zařízení zejména při zásahu do procesu hoření. Jak moc je dané primární opatření účinné a proveditelné závisí na druhu paliva a typu spalovacího zařízení. V praxi se používají jednotlivá opatření dohromady a jejich účinnost dosahuje až 60%. [9]

Snížení přebytku vzduchu

Zmenšením přebytku vzduchu, snížíme zároveň i tvorbu NO_x , z důvodu snížení množství kyslíku v okolí plamene, kde je vysoká teplota. Nevýhodou však je, že se zároveň zvýší CO , protože bude docházet k nedokonalému spalování. Na grafu znázorněném na obrázku č. 3 je zakreslena závislost množství NO a CO na množství spalovacího vzduchu. Když se bude hledat ideální bod, je třeba brát v potaz i možnost přidání dalších opatření, která mohou následné koncentrace ovlivnit.

Obr. č. 3 – Závislost koncentrace NO a CO na přebytku vzduchu

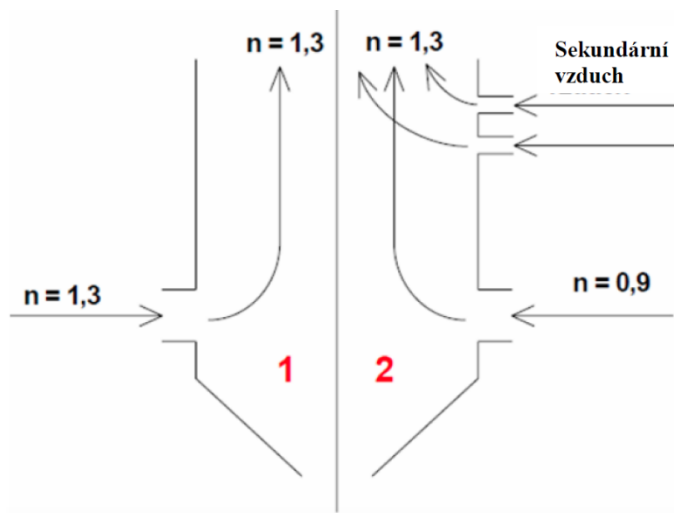


[4]

Stupňování spalovacího vzduchu

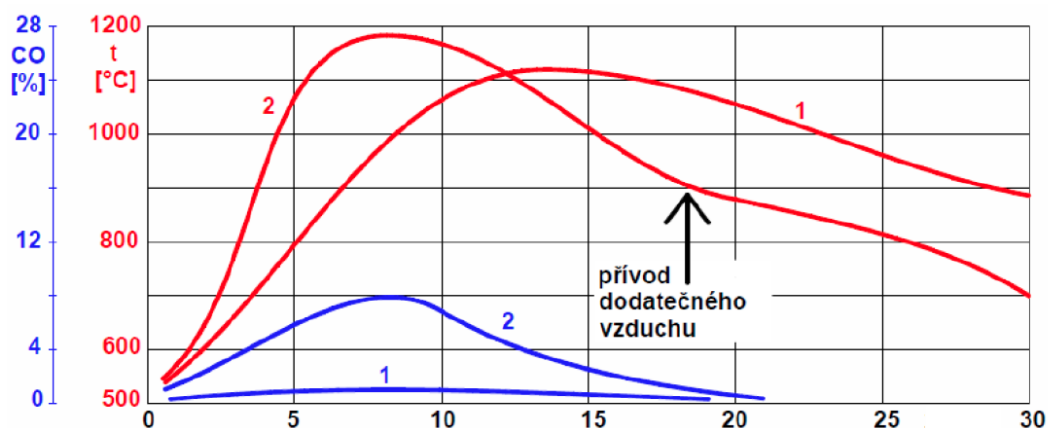
Vzduch lze přerozdělit na primární a sekundární, tím se nám vytvoří dvě či více spalovacích zón. V zóně jedna vstupuje s palivem pouze 70 – 90 % spalovacího vzduchu, takže nebude dostatek kyslíku pro dokonalé spálení, a zároveň nebude dost kyslíku pro reakci s dusíkem v palivu. Tím se nám zamezí tvorba palivových oxidu dusíku. Díky nedokonalému vyhoření paliva dojde ke snížení teploty a zamezení vzniku termických NO_x . V sekundární zóně dochází k přívodu zbytku vzduchu pro spálení, kde zbytek paliva dohoří. Tímto se redukuje nedopal. Pokud dojde ke špatnému rozmístění a nasměrování trysek, může dojít k nedostačujícímu styku sekundárního vzduchu s nedohořelým palivem a tím způsobit problémy s množstvím CO a popřípadě i sazemí ve spalínách. Na obrázku č. 4 můžeme vidět schéma postupného přívodu spalovacího vzduchu do kotle. Na obrázku č. 5 můžeme pak vidět graf, kde je zobrazeno, jak se sníží maximální teplota a zlehka rozloží teplotní pole. Oblasti, ve které je nedostatek vzduchu, se zvýší hodnota CO, ale to postupně vyhoří. Křivky číslo 1 a 2 jsou pak shodné s označením jako na obrázku č. 4. [9]

Obr. č. 4 – Schéma postupného přívodu spalovacího vzduchu do kotle



[4]

Obr. č. 5 – Vliv postupného přívodu vzduchu



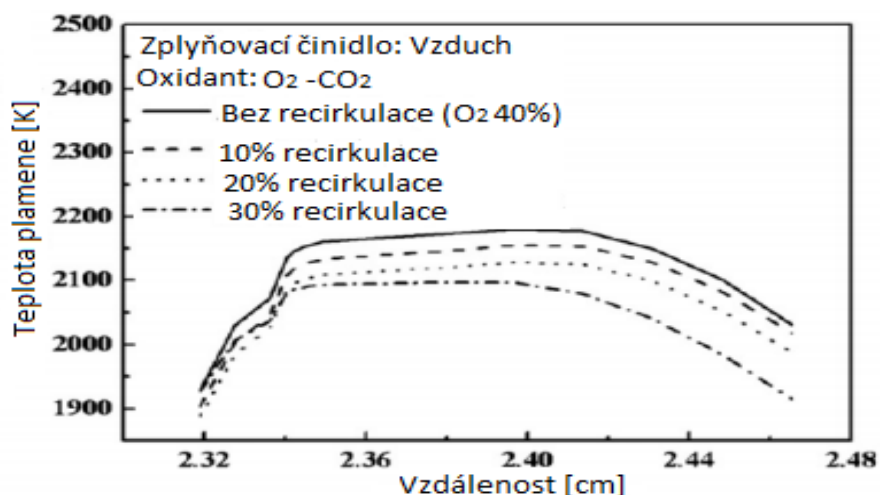
[4]

Při nových instalaci se používají trysky OFA (Over fire air), jedná se o velmi levné opatření, které se hodí na všechny druhy paliva a při dobrém návrhu, metoda neovlivňuje spalovací proces [9]

Recirkulace spalin

Při recirkulaci spalin klesá produkce NO_x termických, tak i palivových. Základem je přidávat spaliny ke spalovacímu vzduchu, tím klesne koncentrace kyslíku a teploty plamene, jak můžeme vidět na obrázku č. 6.

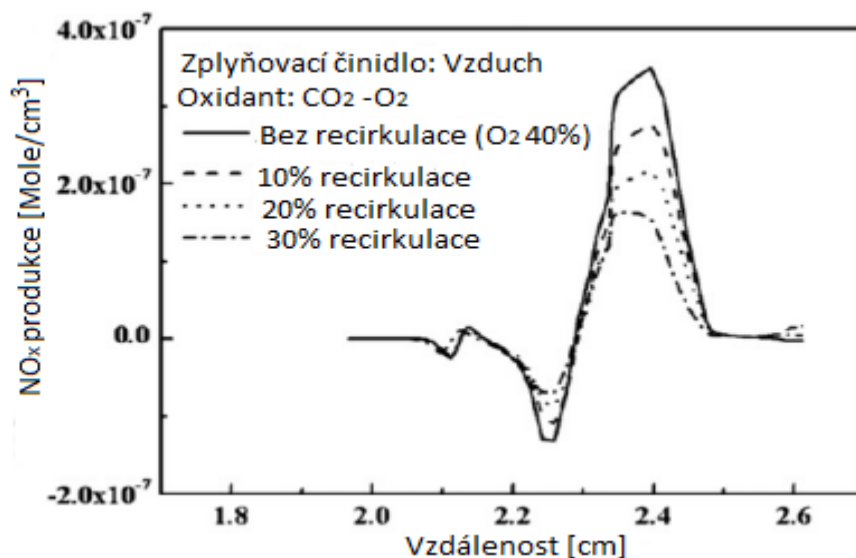
Obr. č. 6 – Vliv míry recirkulace na teplotu plamene



[10]

Přívodem spalín se vzduchem, klesne i hodnota O_2 , což vede k hoření menšího množství paliva, a tedy menšímu vyvinu tepla. Na obrázku č. 7 vidíme, že čím větší množství spalín recirkulujeme, tak klesá i produkce NO_x .

Obr. č. 7 – Vliv míry recirkulace na tvorbu NO_x



[11]

Recirkulace spalín má však i negativní účinek především na tepelnou i celkovou účinnost, tím že musí být umístěn jeden spalínový ventilátor navíc v recirkulačním potrubí, ten způsobí zvýšení vlastní spotřeby elektrárny. Recirkulace existují dvě, a to vnitřní a vnější.

Vnitřní recirkulace

Při vnitřní recirkulaci dochází k odebrání spalín o vysoké teplotě někde na konci spalovací komory, a proto nemůže být spolu s primárním palivem, aby nedošlo k předčasnému vznícení paliva. Z tohoto důvodu mají spaliny u vnitřní recirkulace vlastní přívod. [12]

Vnější recirkulace

U vnější recirkulace spalín se odebírají spaliny ve spalínovém traktu, kde nemají vysokou teplotu. Nejideálnější způsob je odebrání spalín za elektrofiltrem, kde není téměř žádný popílek a nebude tedy docházet k abrazi. Z toku spalín se odebere maximálně 30 %.

[12]

Omezený ohřev vzduchu

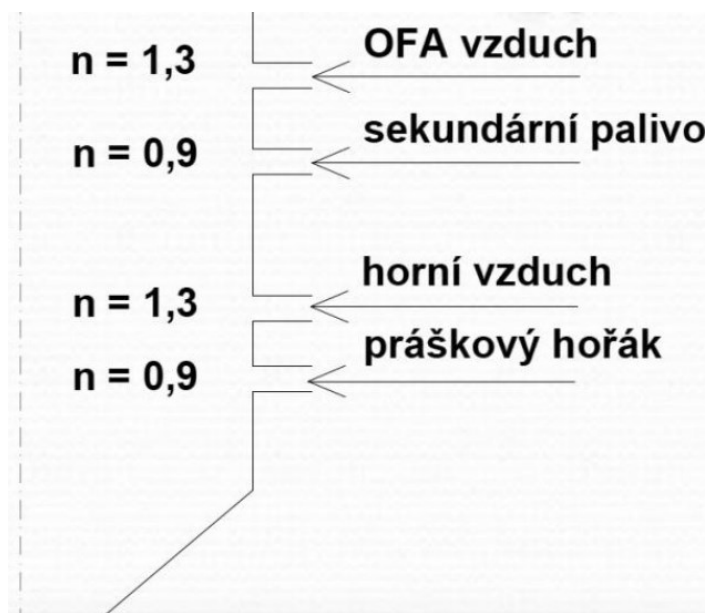
Snížením ohřevu vzduchu ubyde tvorba termických oxidu dusíku, protože s menší teplotou spalovacího vzduchu zmenšíme i teplotu plamene. Úbytek termických NO_x může být až o 30 %, ale samozřejmě i tato metoda má negativní dopady. Zejména u některých kotlů může být teplota spalovacího vzduchu podstatná, kvůli dostatečnému spálení paliva. Navíc teplo, které nepřivedeme ve vzduchu, musí nahradit zvýšení toku paliva, aby zůstal stejný tepelný výkon. Nesmíme zapomenout i na možné zvýšení komínové ztráty, protože ohřívák vzduchu je poslední teplosměnnou plochou, která spaliny ochlazuje. Ale tento problém lze vyřešit například zvětšením ekonomizéru. Takže abychom udrželi tepelnou účinnost, je třeba udělat velké zásahy, což by se nemuselo vyplatit. [9]

Odstupňování paliva

Při této metodě se odstupňuje přívod paliva. Jedna z možností je mít více hořáků, které nebudou mít tak velký plamen, takže všechny reagenty budou opouštět oblast nejvyšších teplot rychle. Tomuhle způsobu však musí být upravena i spalovací komora, aby prostor komory byl rovnoměrně zaplněn plamenem. Následek těchto úprav je především omezení teplotního maxima a v komoře je rovnoměrné teplotní pole. Způsobů, jak využít toto opatření, může být několik.

Palivo, které přivádíme do spalovací komory nejdříve, nazýváme primární. Toto palivo nám zajistí 75 – 90 % tepelného příkonu. Primární palivo jde do komory zespoda, kde jsou spodní řady hořáku. Naopak sekundární palivo, zajišťující zbytek tepelného příkonu, jde do komory hořáky umístěné jako poslední. Palivo sekundární může být stejné jako to primární, ale lze využít i zemní či jiný plyn, kvůli zkvalitnění hoření. Nesmí se ale zapomenout, že zemní plyn díky své ceně zvýší náklady na provoz. Nad hořáky s přívodem sekundárního paliva se nachází přívody vzduchu, a vytváří pak zónu pro vyhoření paliva. Při této metodě dochází ke kombinaci s odstupňování vzduchu i nad jednotlivými hořáky, takže spalování je podstechiometrické a sekundární vzduch je přiváděn nad těmito hořáky. V oblastech podstechiometrického spalování dochází k nadměrné produkci CO, který reaguje s NO, který se vytvoří v nižších řadách, a tedy se dále redukuje NO[9]. Základní schéma takového provedení je na obrázku č. 8.

Obr. č. 8 – Schéma spalování s odstupňováním paliva

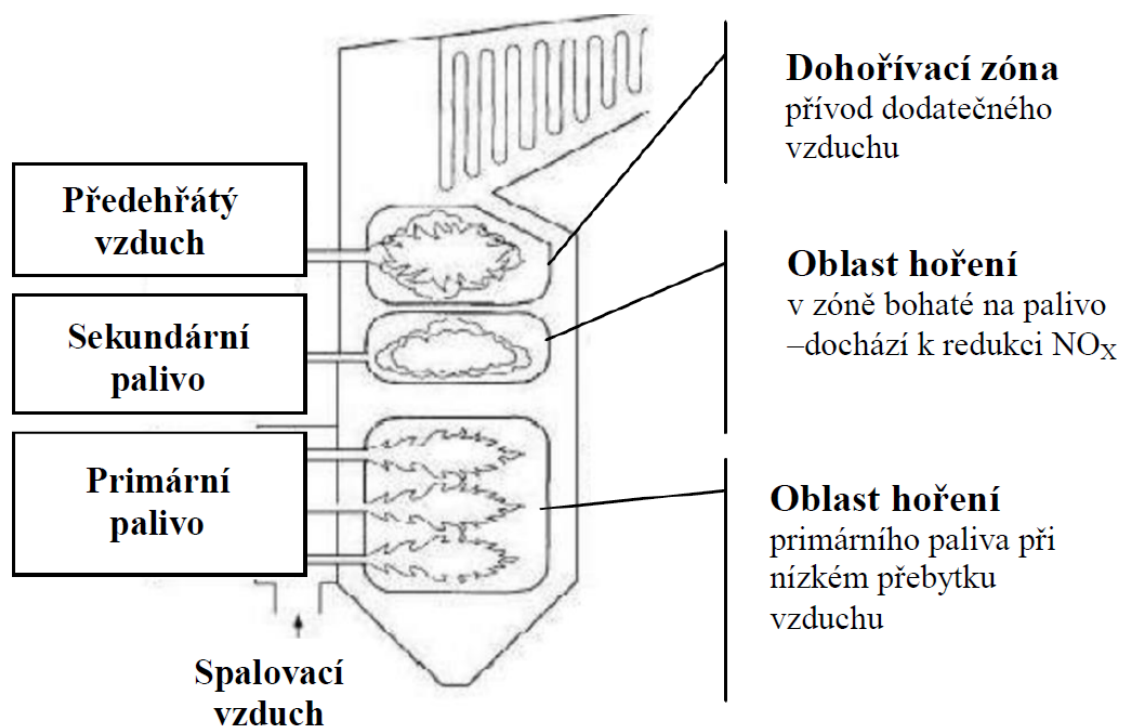


[4]

S odstupňováním paliva je třeba i zjemnit jeho mletí. Při zmenšení částic zvětšíme jejich měrný povrch, a dochází k rychlejšímu a lepšímu prohoření paliva. Díky jemnějšímu palivu není potřeba, aby byl takový velký přebytek vzduchu. Kyslík se totiž lepe promísí s palivem, takže se omezí tvorba NO_x . Zlepšení hoření doprovází i snížení tvorby CO. Avšak opět s lepším mletím, roste vlastní spotřeba elektrárny. Je třeba najít kompromis. Částice, které přichází jako primární palivo, jsou ve spalovací komoře déle, takže nemusí být tak jemné jako ty, které pak přichází do spalovací komory z vrchních řad jako sekundární palivo. [4]

Existuje také metoda známa jako Reburning, kdy je primární palivo spalováno v dolní části spalovací komory za minimálního přebytku vzduchu (cca $n = 1,1$), takže se spálí skoro dokonale a nadměrně vzroste množství NO. Tato dolní část komory by měla být navržena tak, aby v oblasti sekundárního přívodu paliva nezůstal téměř žádný kyslík. Sekundární palivo je pak stejné jako primární, nebo je nahrazeno plynem. Se sekundárním palivem je přivedeno takové množství spalovacího vzduchu, aby hoření probíhalo podstechiometricky, kdy přebytek vzduchu n je v rozmezí 0,7 - 0,9. To je z důvodu tvoření velkého množství CO, který reaguje se vzniklým NO ze spodní části komory a výrazně se tak omezí oxid dusnatý. Zbýlý oxid uhelnatý reaguje s kyslíkem v dohořívací zóně, kde je přiveden vzduch. [9] Schéma reburning je na obrázku č. 9.

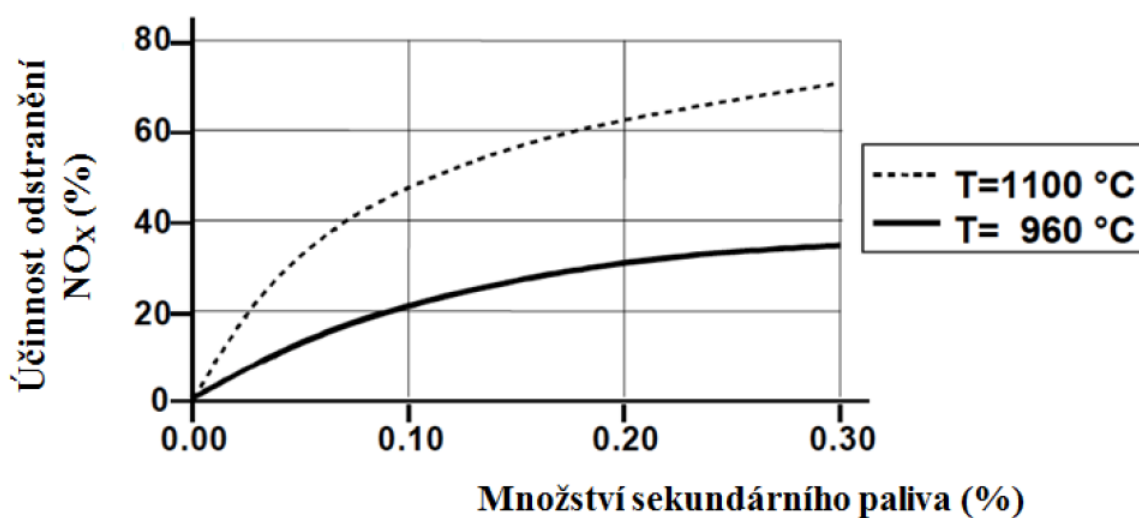
Obr. č. 9 – Schéma reburning



[9]

Účinnost reburningu závisí na několika parametrech, především je to teplota a pak doba jakou stráví směs v sekundární zóně. Teplota by se měla blížit k zhruba $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a čas. Doba setrvání by měla být v rozmezí od 0,4 do 1,5 sekundy. Další parametry jsou pak dostatečné promísení paliva v primární zóně a také jaké množství sekundárního paliva je přivedeno. Tento parametr je na obrázku č. 10 zobrazen jako závislost účinnosti redukce NO_x na množství sekundárního paliva. [9]

Obr. č. 10 – Závislost účinnosti redukce NO_x na množství sekundárního paliva



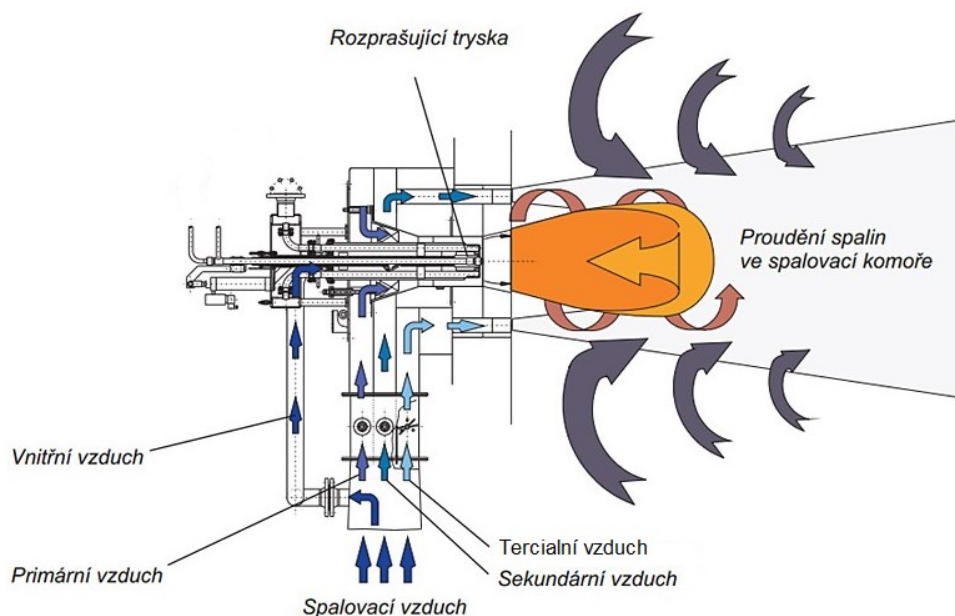
[9]

Nízkoemisní hořáky

Jedním z dalších způsobů, jak zmenšit emise oxidů dusíku, jsou nízkoemisní hořáky. Tyto hořáky mají hned několik již zmíněných opatření zabudované přímo v sobě. Existuje hodně druhů, každý výrobce dělá něco jinak, dokonce se mohou hořáky úplně lišit. U nízkoemisních hořáků se úmyslně snižuje mixování paliva se vzduchem, takže dochází k rovnoměrnému spalování napříč celým plamenem. Oproti klasickým hořákům, kde se směs díky dobrému promíchání pálí už u ústí hořáku, kde je velká teplota a produkuje se tam nejvíce termických NO.

Tyto speciální hořáky mají postupný přívod vzduchu. Spalovací vzduch se přivede hned třikrát. Ten první dohromady s palivem, tak aby palivo hořelo podstechiometricky. Sekundární směs je vedena do středu hořáku a vytváří vír, k tomu samozřejmě dopomáhá i tvar ústí hořáku. Vír zajišťuje zapálení směsi hned u kořene paliva. Třetí část spalovacího vzduchu je pak vedena po okraji, tak aby docházelo ke spálení zbytku paliva a popřípadě i vzniklého oxidu uhelnatého. Na obrázku č. 11 můžeme vidět, jak může vypadat tok spalovacího vzduchu tryskou nízkoemisního hořáku.

Obr. č 11 – Schéma nízkoemisního hořáku



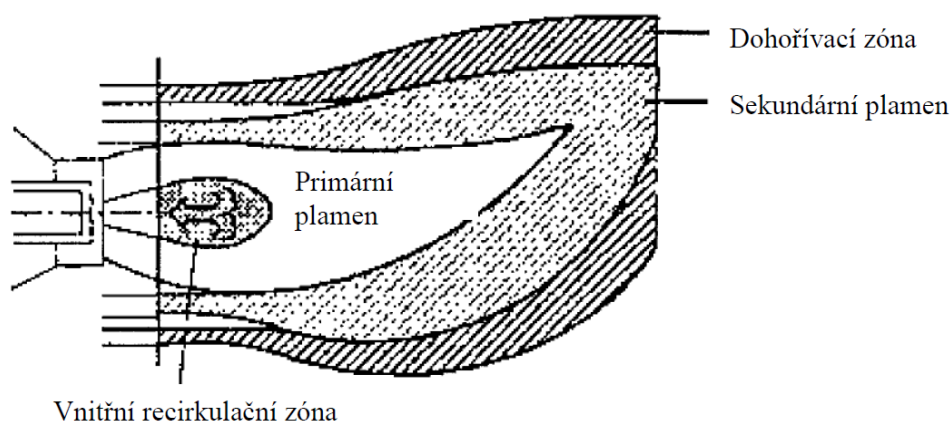
[13]

Do hořáku můžeme zavést i spaliny, které recirkulujeme, abychom schladili plamen a docílili tím snížení koncentrace kyslíku.

Hořáky, které mají postupný přívod paliva, spalují palivo přicházející s primárním vzduchem stechiometricky, kdy přes střed plamene je veden vzduch s přebytkem. Okolo hořáku je pak vedeno palivo sekundární, které se pálí podstechiometricky, aby docházelo

k redukci NO pomocí vzniklého CO. Pomocí terciálního vzduchu je pak opět vypálený přebytek CO. Na obrázku č. 12 je nakreslený plamen u nízkoemisních hořáků. [9]

Obr. č. 12 – Plamen nízkoemisního hořáku



[9]

Nízkoemisní hořáky nové generace

Hořáky nové generace už dokáží kombinovat postupný přívod paliva a vzduchu, dokonce i recirkulaci spalin. Tyto hořáky se zatím používají hlavně u spalovacích turbín vzhledem k náročnosti na jejich konstrukci. Hodně těmto hořákům přidává to, že je rapidně zmenšen jejich průměr plamene, díky tomu se můžou vyměnit za ty, které jsou v kotlích doposud. Pro snížení jejich průměru bylo třeba upravit trysky, které vypouští sekundární vzduch, tak aby bylo dosaženo velké rychlosti spalovacího vzduchu. Při správné rychlosti a nasměrování toku vzduchu dojde k usměrnění plamene k jeho středové ose. [9]

Budoucnost primárních opatření

Existuje mnoho dalších, zatím ale teoretických možností jak snížit tvorbu oxidů dusíku pomocí primárních opatření. Ale přece jenom jedna věc stojí za zmínění. A je to optimalizace spalovacího procesu za pomocí automatizace. Tato automatizace dokáže měnit na základě výstupních veličin, veličiny vstupní. Tuhle umělou inteligenci dnes prodává firma Siemens a nazvala ji GT – ACO (Gas Turbine Autonomous Control Optimizer). Siemens informuje, že tahle technologie se dokáže přizpůsobit a poznat turbínu během 2 týdnů. Během 14 dnů si sbírá data, vyhodnocuje, ale nezasahuje do procesů. Dle společnosti má systém velmi dobré výsledky, kde byl testován na provozovaných turbínách. Systém prokazatelně snížil emise NO_x až o 20 % oproti klasickému systému řízení. [14]

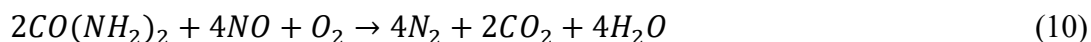
Hodně zařízení dnes používá ke snižování emisí oxidu dusíku reakci CO s NO v redukční atmosféře. Na teoretické bázi jde o velmi účinný a jednoduchý mechanismus, ale dosažení ideálního promíchání, kdy snižujeme koncentraci oxidu dusnatého a uhelnatého, není lehké dosáhnout. Dalším problémem je pak možné dosažení vysokoteplotní koroze právě ve zmiňované redukční atmosféře CO. Vysokoteplotní koroze může velice poškodit teplosměnné plochy, což by vedlo k zvednutí nákladů.

2.2 Sekundární opatření

Primární opatření se starají omezení vzniku NO_x, tomu však zamezit úplně nejde, tak přichází na řadu sekundární opatření, která oxidy dusíku odstraňuje z již vzniklých spalin. Metody sekundárních opatření jsou pomocí chemických reakcí přeměnit NO_x na látky, které nejsou pro okolí nebezpečné. Dvě nejběžnější metody jsou selektivní katalytická (SCR) a nekatalytická metoda (SNCR).

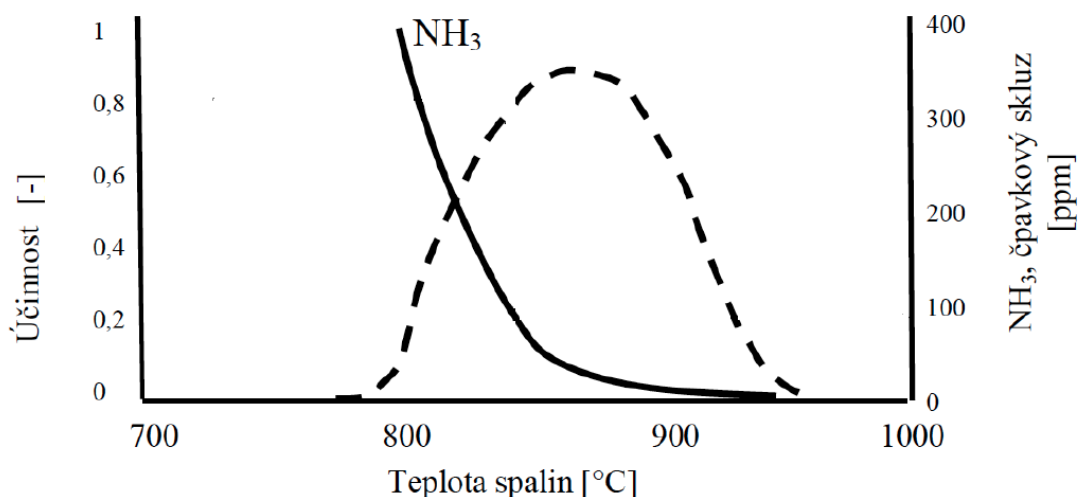
2.2.1 Selektivní nekatalytická metoda

Tato metoda snižuje množství oxidů dusíku za pomoci roztoku močoviny nebo čpavku jako reagentu. V rovnici č. 10 můžeme vidět reakci oxidu dusíku s močovinou a v rovnici č. 11 pak reakci NO_x se čpavkem. Obě tyto reakce doprovází samozřejmě i další vedlejší reakce.



Močovina nebo čpavek se musí dodávat do místa se správnou teplotou, buď do spalovací komory, nebo do prvního tahu kotle. Teplota je však proměnlivá vzhledem k měnícímu se výkonu kotle, tak se mění i místo, které je nejvhodnější pro vstříknutí reagentu. K tomu slouží trysky, které jsou umístěny na různých místech a spínají se dle aktuální teploty. Teplota, která je vhodná pro tuto reakci, je kolem 900 – 1050 °C pro močovinu a 850 – 1000 °C pro čpavek. Když není dosaženo dostatečné teploty, reakce neproběhne a narůstá tzv. čpavkový skluz. Při opačné situaci pak čpavek je oxidován. Na obrázku 15. můžeme vidět graf závislosti účinnosti této metody a čpavkového skluzu na teplotě spalin, za které reakce probíhají.

Obr. č. 13 – Vliv teploty na účinnost SNCR



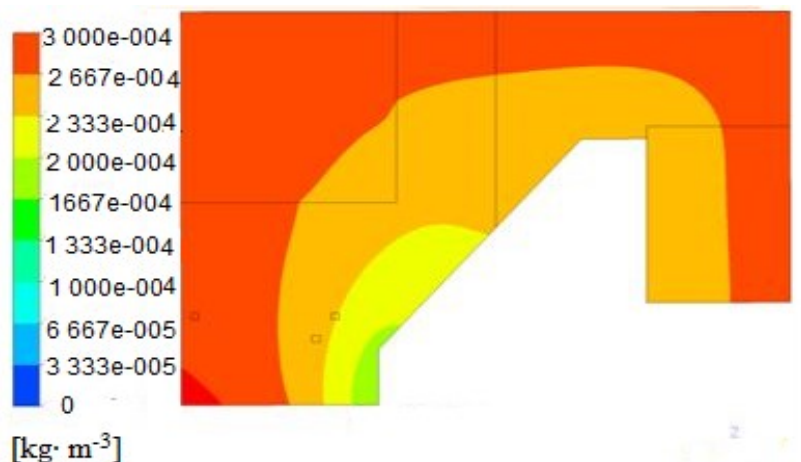
[15]

Jedním z podstatných rozdílů těchto reagentů je v jejich skladování. Močovina je bez zápachu, dá se skladovat v pevném stavu, a nebo v beztlakých nádržích, zatím co se čpavkem, používá se téměř výhradně čpavková voda, je větší problém. Čpavek musí být bezpečně uložen tak, aby nedošlo k jeho úniku do ovzduší. Čpavek je převážně skladován v tlakových nádržích. V místě uskladnění musí probíhat neustále měření jeho množství ve vzduchu. Hlavní nevýhodou močoviny je vznik N_2O , tedy oxidu dusného, který je nežádoucí. Močovina jako reagent je méně účinná, navíc může vzniknout problém s korozí. Močovina se proto používá u malých kotlů, maximálně do výkonu kolem 50 MW_t, z důvodu ušetření na skladování čpavku. [9,16]

K reagentu je nutné přivést pro správnou reakci i vzduch. Ten se dá přivést dvěma způsoby. Buď samotnými tryskami, a nebo může vzduch fungovat jako nosné medium reagentu. Dobré řešení je také dopravit vzduch do kotle pomocí OFA trysek, tím se ušetří náklady a dobře se promísí i se spalinami. Neméně důležité je také dobré promíchání reagentu se spalinami. Pokud je reagent ve vodném roztoku, musí být kromě nasměrování proudu, taky zajištěna velikost kapek. Jejich velikost musí být ideální, při menších kapkách se voda vypaří moc brzy a nedojde k předčasnému vypaření vody a roztok pronikne hlouběji do spalovací komory. Pokud jsou však kapky moc velké, dochází k odpaření vody moc pozdě, kde teplota už není pro reakci ideální. Nesmíme však zapomenout na to, že používáme primární opatření, takže nemusí být dostatečné množství NO pro styk s reagentem. Při běžném provozu se proto povoluje přebytek do 2,5, aby bylo dost reagentu při nižší koncentraci NO. Výhodou této metody je především malý nárok na prostor a především investiční náklady. Účinnost této metody se může vyšplhat až na 45

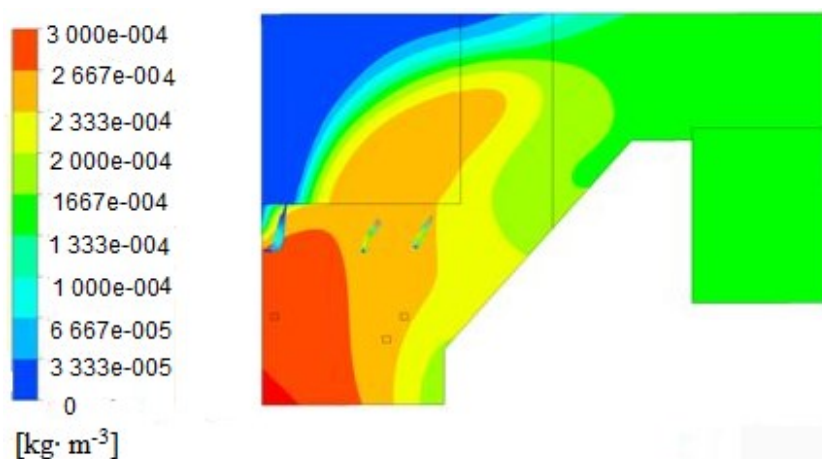
%. Na obrázcích číslo 14 a 15 můžeme vidět rozdíl koncentrace NO_x před a po použití metody NSCR na granulačním kotli.

Obr. č. 14 – Koncentrace NO_x v granulačním kotli bez použití SNCR



[17]

Obr. č. 15 - Koncentrace NO_x v granulačním kotli s použitím SNCR



[17]

Tato účinnost však závisí na podmínkách a také na typu spalovacího zařízení. Díky tomu se používá účinnější metoda a tou je SCR, tedy selektivní katalytická metoda.

2.2.2 Selektivní katalytická redukce

SCR metoda, je výrazně vylepšená oproti nekatalytické redukce. Nejvýraznějším rozdílem je právě katalyzátor, který chemickou reakci udělá více účinnou a hlavně ji umožní provádět při nižší teplotě. Díky tomu můžeme provádět chemickou reakci v jiné části spalovacího zařízení, a nebo dokonce až za něj. Samotné katalyzátory se můžou skládat s různých materiálů. Teplota, kdy je reakce účinná, je pak v závislosti na použitém

katalyzátoru od 170 °C do 510 °C. Ta se pak odvíjí od použitého katalyzátoru. Reagent používaný u této metody je již zmíněný čpavek, nebo jeho vodný roztok. SCR metoda existuje ve třech variantách. Varianty se liší dle umístění jejich katalyzátoru, které mají různé konstrukce. Varianty jsou pak Tail end, Low dust a High dust.

Reagenty u SCR

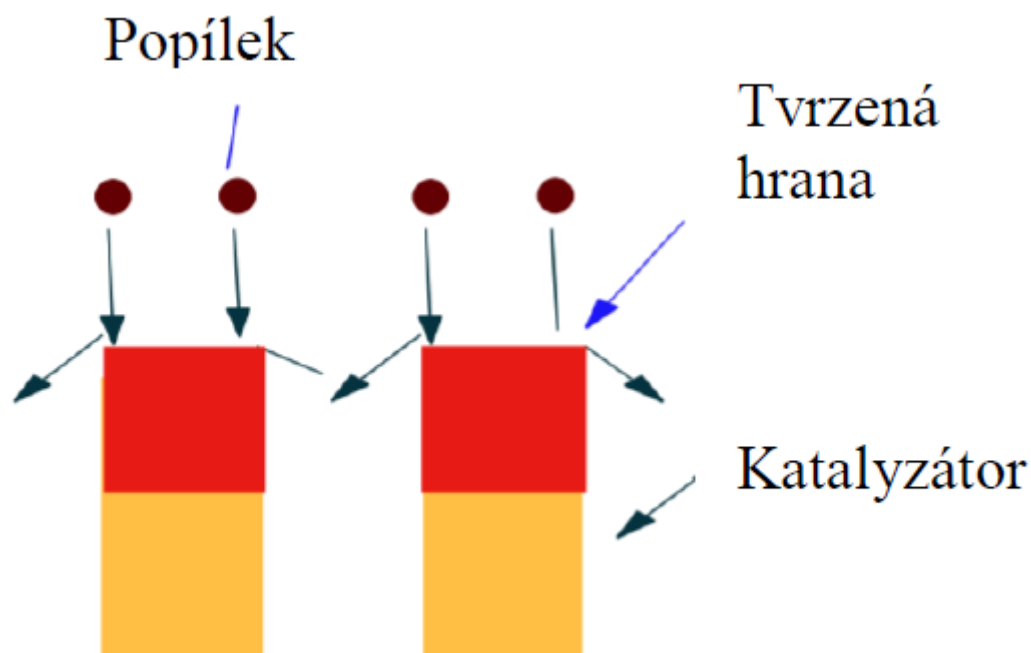
Reagenty pro SCR je, jak již bylo zmíněno čpavek, v přívodu pak především jako čpavková voda.. Nás bude zajímat vodní roztok čpavku, protože močovina se u velkých energetických zdrojů nepoužívá. Při používání čpavkové vody musíme dbát na bezpečnost uložení. Čpavková voda se skladuje buď v tlakových nádržích, nebo jako roztok. Čpavek před použitím je potřeba odpařit a pak se až míchá s nosným médiem. Pak může být teprve dopraven do reaktoru. Jako nosné medium se používá nejčastěji vzduch, ale je možné použít i páru. Vzduch je lepší, protože slouží jako okysličovadlo.

Pokud je čpavek ve vodném roztoku, jeho koncentrace je 29,4 %, ale můžou se využívat i menší koncentrace okolo 20 %, běžné to ale není. [9,16]

Materiály SCR katalyzátorů

Jeden z prvních materiálů, který sloužil k výrobě katalyzátorů, byla platina, která především díky své ceně byla nevhodná. S platinou se používalo taky paladium a rhodium. Postupem času se však přešlo na levnější varianty, která měla stejnou efektivitu. Těmi materiály jsou titan, wolfram nebo vanad. Další zlepšení už se netýkalo až tak ceny, jako zlepšení reakce samotné. Postupně se začaly přidávat příměsi, a nebo dokonce úplně nové složení katalyzátoru. Cílem u katalyzátoru bylo hlavně dosáhnout největší účinnosti reakce za dané teploty a prodloužení jeho životnosti. Důležité je pak nevystavit katalyzátor usazování pevných částí a tzv. otravě katalyzátoru. Při navrhování katalyzátoru je nutné brát zřetel na tlakovou ztrátu, která by měla být co nejmenší, aby se nezvýšili náklady na spalínový ventilátor. Před erozí se katalyzátor chrání pomocí tvrzených hran, které ale snižují jeho měrný povrch. Jak fungují tvrzené hrany, můžeme vidět na obrázku č. 16.

Obr. č. 16 – Ochrana katalyzátoru před erozí



[9]

Katalyzátory se dělí do čtyř skupin dle materiálu. Jsou to katalyzátory s kovovými oxidy, aktivním uhlím, zeolity a oxidy železa. [9,15]

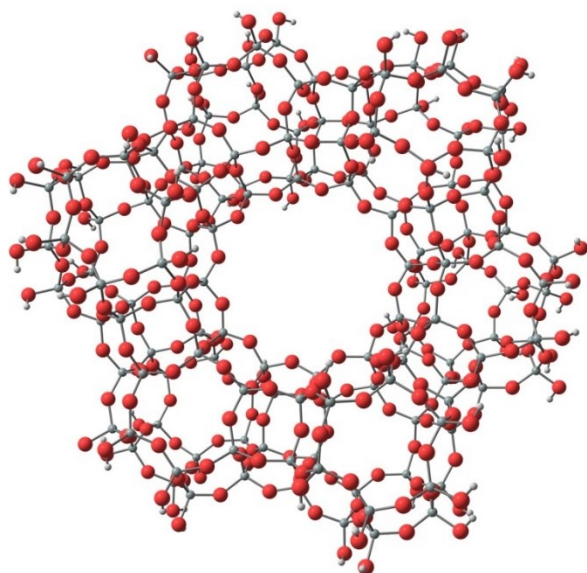
Katalyzátory s kovovými oxidy

Tenhle typ je typický tím, že má kovovou nebo může být i keramická podložka, která je nosičem katalyzátoru. Mezi nosiče patří například oxid hlinitý (Al_2O_3) nebo oxid titaničitý (TiO_2). Na nosiči je pak aktivní katalytická vrstva. Tato vrstva je složená z oxidů vanadu, molybdenu, křemíku a wolframu. Oxid vanadičný (V_2O_5) je zastoupen nejvíc, pak je menší příměs na rozšíření teplotního okna, kterou tvoří oxid wolframový (WO_3). Pro zvýšení odolnosti katalyzátoru je potřeba oxid křemičitý (SiO_2), a jako poslední je oxid molybdenový (MoO_3), který zabraňuje otravě katalyzátoru částicemi ve spalínách. Pro zvýšení katalytické aktivity V_2O_5 je vhodný TiO_2 . Teplota, kdy je katalyzátor nejúčinnější, je mezi 300 až 450 °C. Tyto katalyzátory patří k těm levnějším, avšak nevýhodou těchto katalyzátorů je především nízká teplotní odolnost a zvyšují reakci, při které oxiduje oxid (SO_2) siřičitý na oxid sírový (SO_3). [9,15]

Zeolity

Zeolity jsou krystalické hydratované aluminosilikáty alkalických kovů a kovů alkalických zemin. Jedinečnost spočívá v tom, že prostorové uspořádání atomů vytváří kanálky a dutiny konstantních rozměrů. Strukturu zeolitu můžeme vidět na obrázku č. 17. Zeolity jsou pak nanášeny na kovové nebo keramické podložce. Zeolity jsou neuvěřitelně odolné vůči teplotě. Odolávají teplotám až 600 °C. Kromě teplotní odolnosti mají také, zejména kvůli jejich pórům, velký měrný povrch. V těchto katalyzátorech se také snižuje nežádoucí oxidace SO_2 na SO_3 . Nevýhodou těchto katalyzátorů je však jejich cena. Z toho důvodu se používají na místech, kde je vysoká teplota a velký výskyt síry. [16]

Obr. č. 17 – Struktura zeolitu



[18]

Oxidy železa

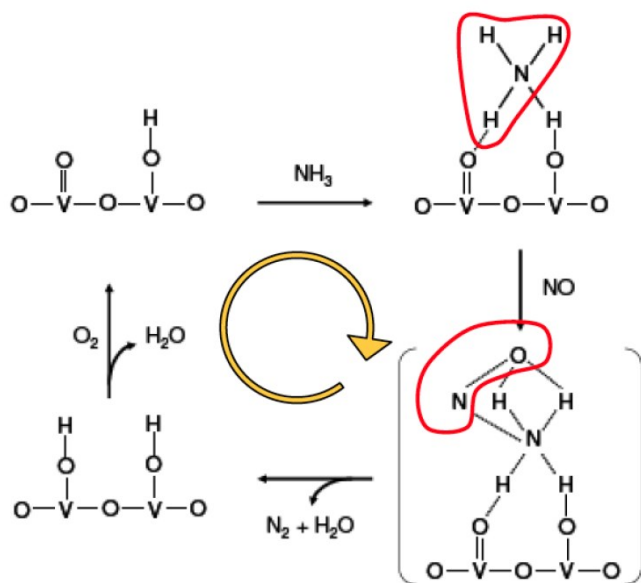
Tyhle katalyzátory se používají pro reakci s reagentem, který je roztok močoviny. Stavebním materiálem jsou oxidy železa, které jsou pokryty železnatým fosfátem ($\text{Fe}(\text{PO}_4)_2$). Tato vrstva $\text{Fe}(\text{PO}_4)_2$ má za úkol ochránit katalyzátor před korozí. [16]

Mechanismus reakce

Na katalyzátorech ze zeolitu nebo z aktivních kovových složek probíhá reakce, kterou nazýváme Eley-Ridealův mechanismus. Tento proces začíná, když povrch katalyzátoru

adsorbuje NH_3 . Pomocí difuze se střetne NO s NH_3 . Tomuto střetnutí napomůže turbulentní proudění v katalyzátoru, kterého docílíme zúžením průřezu jeho kanálků. Po střetnutí máme dva výsledné produkty a to dusík (N_2) a vodu (H_2O), které jsou oba v plynné fázi. Následně dochází k regeneraci s kyslíkem. Na obrázku č. 18 můžeme vidět celý proces.

Obr. č. 18 – Eley-Ridealův mechanismus

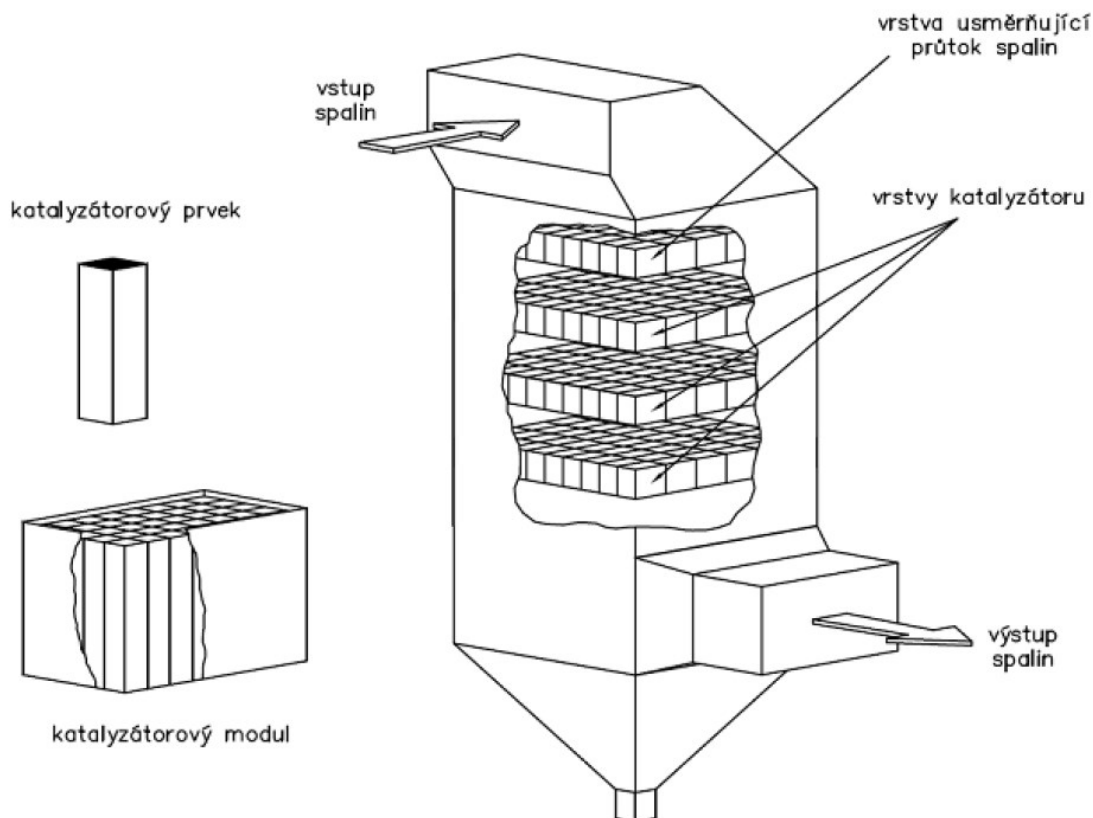


[19]

Konstrukční provedení katalyzátoru

Katalyzátory jsou, co se týče konstrukce, tři typy. Honeycomb - „Plastrové“, Plate - deskové, a nebo v podobě pelet. Plastrové a deskové jsou tvořené katalytickými vrstvami z modulů. Tyto moduly mají jednotný rozměr např. 1 x 1. Na obrázku č. 19. jsou znázorněné katalytické vrstvy, jak jsou umístěny v katalyzátoru. Každý modul se skládá z katalyzátorových prvků. Jak jsou uloženy v modulech, můžeme rovněž vidět na obrázku obr. č. 19. Tyto moduly jsou pak už vyplněny reagentem. [9,15]

Obr. č. 19- Znázornění skladby katalytických vrstev v SCR reaktoru

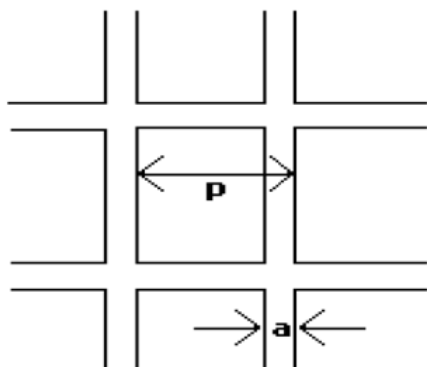


[16]

Honeycomb Plastové katalyzátory

Tento katalyzátor je jinak nazývaný jako Honeycomb. Tento katalyzátor je vhodný pro využívání kovových oxidů nebo zeolitů. Honeycomb může být taky vyroben z TiO_2 , který obsahuje aktivní látky. U návrhu toho katalyzátoru je potřeba počítat s hlavním rozměrem, který se značí písmenem „p“ od slova „pitch“. Tento rozměr je šířka stěny a šířka čtvercového otvoru. Tento rozměr je znázorněný na obrázku č. 20. Velikost kanálků se u různých katalyzátorů může lišit. Šířka kanálku je daná především typem SCR metody a také palivem, protože se musí zabránit případnému ucpaní kanálků. U pevných paliv, kdy je použit typ High dust je velikost kanálků až 9 mm pro Low dust zhruba 7 mm. Pokud je použito plynné palivo, tak velikost kanálku 3 mm je dostačující. Objem katalyzátoru je pak podstatně menší. [15]

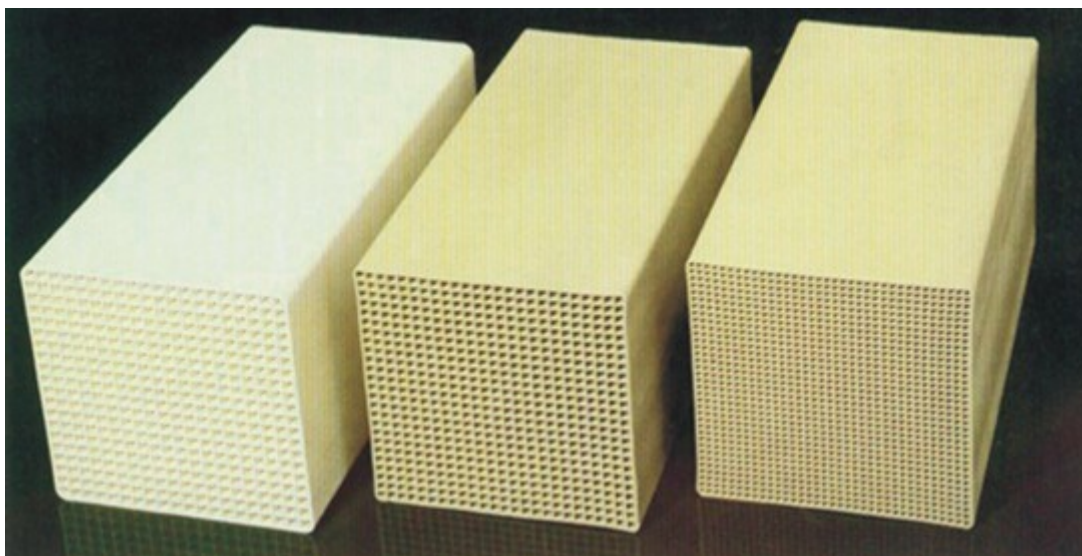
Obr. č. 20



[9]

Díky své malé velikosti, mají kanálky dost velký měrný povrch. Hlavní nevýhodou je dost velká tlaková ztráta, oproti platovému typu, protože dochází k víření uvnitř malých kanálků. Na obrázku č. 21 je vidět, jak vypadá reálný modul složený z plástrových elementů. [15]

Obr. č. 21 – Modul složený z plástrových elementů



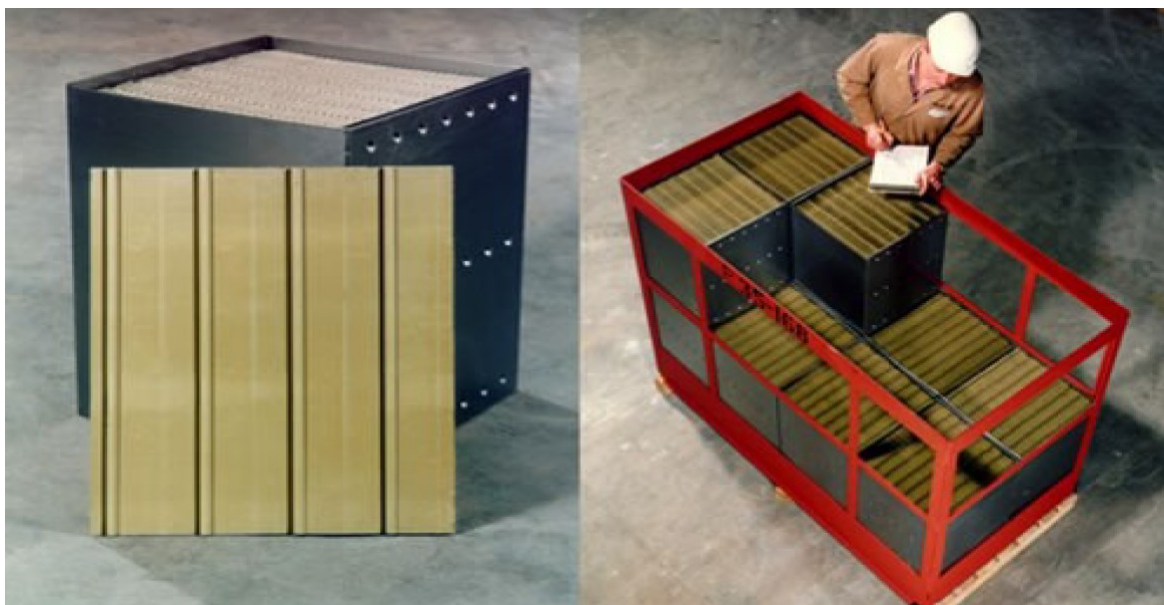
[20]

Deskový typ

Tento typ tvoří jako matrice kovové „drátěné“ pláty, na kovové matici je umístěn vlastní katalytický materiál, typově stejný jako u Honeycomb. Tyto pláty mohou mít výstupky nebo mohou být různě tvarované. U tohoto typů se využívají aktivní látky TiO_2 , V_2O_5 a další oxidy, které jsem již zmiňoval v předchozí kapitole. Tyto látky jsou válcovány na síti z nerezové oceli. Primární výhodou u tohoto provedení je větší odolnost

vůči abrazi. Kovová matrice na náběžné hraně, po odabradování katalytické vrstvy, tvoří ochranu proti další abrazi katalytické vrstvy, tento typ je tedy určen pro spaliny s vyšší obsahem popílku, tedy např. pro hnědá uhlí. Mívá i menší tlakovou ztrátu, díky velikosti kanálku totiž nedochází k jejich ucpávání, jako u plastového katalyzátoru. Na obrázku č. 22 je zobrazen katalyzátorový modul z plátových elementů. [16]

Obr. č. 22- Složený katalyzátorový modul z plátových elementů



[15]

Pelety

Pelety se využívají především pro aktivní uhlí, a nebo zeolity. Tyto pelety se nachází ve spalínách, aby došlo ke správnému promíchání reagentu, a ideálnímu styku spalin s katalyzátorem. Tenhle typ není vždy vhodný, dochází často k ucpávání katalyzátoru a abrazi. [16]

Čištění a regenerace katalyzátoru

Pro očištění katalyzátoru, to znamená odstranění nánosů z povrchu a z kanálků, se používají u mnoha případů především ofukovače. Ty se pak umísťují nad katalytické vrstvy. Jako médium pro ofukování se využívá pára nebo stlačený vzduch.

Pro regeneraci, tedy zaktivování již deaktivovaných částí katalyzátorů, se využívá kyslík. Tato regenerace probíhá za provozu. Nebo se využívá teplotní regenerace, kdy se odpaří nepotřebné látky usazené v katalyzátoru. Pokud však dojde k deaktivování katalyzátoru, kdy se usadí zkondenzované látky a znemožní adsorpci reaktantů, je nutné

použít chemická činidla, aby katalyzátor mohl být znovu aktivní. Tuto regeneraci provádí zásadně daný výrobce katalyzátoru, a katalyzátor pak může dosáhnout efektivity, jakou měl původně. Po určité době se aktivní vrstva na katalyzátoru ztenčí tak, že regenerace bude jen částečná, a nebo dokonce nemožná, tím pádem dochází k úplné výměně. [9]

Deaktivace katalyzátoru

Deaktivací je myšleno oslabené schopnosti katalyzátoru na určité minimum, poklesu aktivity katalyzátoru, kdy už musí být katalyzátor vyměněn. V rovnici č. 12 je vidět, že deaktivace je funkcí času, kdy je katalyzátor provozován. [9]

$$K_{kat} = \frac{K_0}{e^{\frac{t}{\tau}}} \quad (12)$$

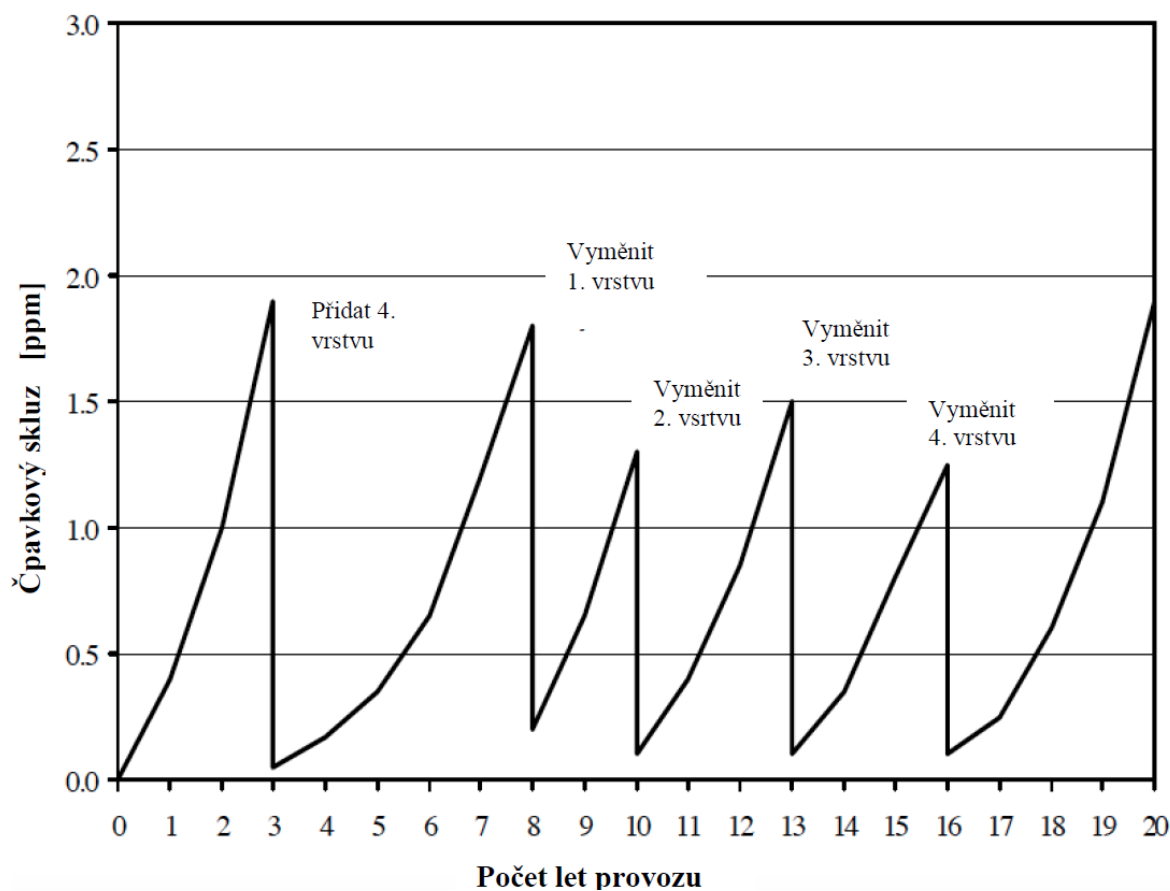
Kde: K_{kat} aktivita katalyzátoru v čase „t“
 K_0 původní aktivita katalyzátoru
 t doba provozu katalyzátoru
 τ životnost katalyzátoru

Na rychlost deaktivace má vliv více faktorů. Tyto faktory však jsou závislé na podmínkách, které jsou v spalínovém traktu. Především se jedná o teplotě spalin a jejich složení. Hlavním nepřítelem jsou však katalytické jedy, které jsou schopny deaktivovat plochu katalyzátoru díky chemickým vazbám. dalším mechanismem je pokrytí plochy popílkem. Příkladem těchto jedů jsou například arzén, oxidy vápníku, magnesia a také alkalické kovy. Dalším nebezpečným faktorem je příliš vysoká teplota. Za vysoké teploty dochází k zalepování pórů, protože měkne materiál a tím pádem se mění i jeho struktura, sintrace katalytických jader a tím snižování měrného reakčního povrchu. Snížení měrného povrchu zapříčiňují také pevné částice, popílek, a nebo síran amonný $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$, který vznikne po reakci SO_3 , NH_3 a vody. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, popřípadě hydrogen síran amonný $(\text{NH}_4)_2\text{HSO}_4$, zalepí katalyzátor při nízké teplotě. Pro regeneraci je možné katalyzátor ohřát za určitých podmínek, aby došlo k vypaření škodných látek, a tím katalyzátor regenerovat. Důležité je tedy nastavit aktivitu katalyzátoru i s ohledem na konverzi SO_2 na SO_3 .

Jako poslední hrozbou pro katalyzátor jsou pevné částice proudící spalinami. Tyto částice způsobují erozi. Z toho důvodu by spaliny neměly mít velkou rychlost, a nebo konstrukce katalyzátoru tomu musí být uzpůsobena. Katalyzátor se proto může dělat z tvrdnějšího materiálu, nebo se přidává materiál na hrany, to však vede ke snížení aktivního povrchu. [15]

Účinnost denitrifikace je závislá na aktivitě katalyzátoru, pokud poklesne aktivita, zároveň naroste koncentrace NO. Když poklesne aktivita, je nutné dodat čpavek a ten zase zvedne nežádoucí čpavkový skluz. Z těchto důvodů je třeba se o katalyzátor neustále starat, regenerovat ho, a nebo měnit katalytické moduly. Když se projektuje SCR, je nutné vypracovat plán katalyzátorového hospodaření. Na obrázku č. 23 můžeme vidět příklad takového plánu, který popisuje závislost čpavkového skluzu na čase, kdy musí zůstat konstantní účinnost denitrifikace. [9]

Obr. č. 23 – Příklad plánu katalyzátorového hospodaření



[9]

Výměna katalytických vrstev probíhá u provedení High dust častěji oproti Thail end. Opakem je pak Tail end, kdy výměna probíhá daleko později. U provedení low dust záleží jak moc je kvalitní elektrofiltr.

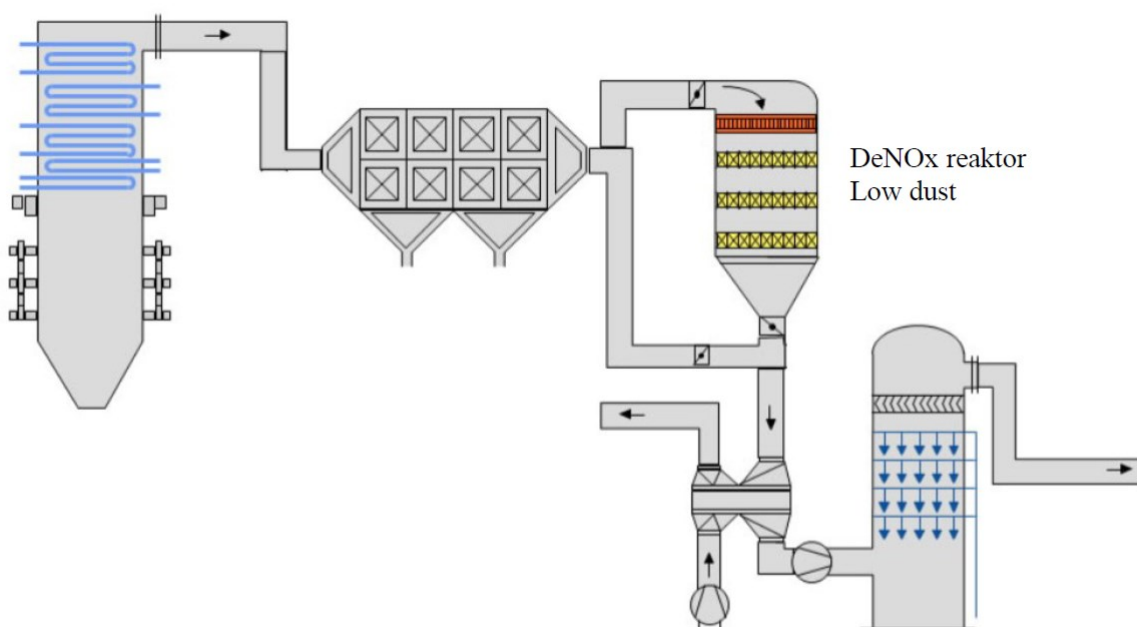
Provedení SCR metody

Jak již bylo zmíněno, existují tři typy provedení SCR. V následující kapitole budou jednotlivé kapitoly popsány detailněji, a bude zobrazeno umístění ve spalinovém traktu

Low dust

Při SCR metodě typu Low dust se katalyzátor umísťuje před ohřívák vzduchu a před reaktorem je vysokoteplotní elektrostatický odlučovač, takže po odloučení pevných částic netrpí katalyzátor tolik na deaktivaci jeho zanesením, a nebo otravou katalytickými jedy. Ohřívák vzduchu je tím pádem chráněn před abrazí, ale je vystaven nebezpečí, co přináší sebou čpavek a oxidace SO_2 v katalyzátoru, a to je koroze. Pro správné fungování katalyzátoru je třeba dostatečná teplota, je tedy nutné ji regulovat buď pomocí ekonomizéru, nebo i ohřevem spalin. Tento systém není moc vhodný na retrofity, z důvodu velkých konstrukčních úprav by to bylo velice nákladné. Na obrázku č. 24 vidíme umístění systému Low dust.

Obr. č. 24 – Umístění Low dust



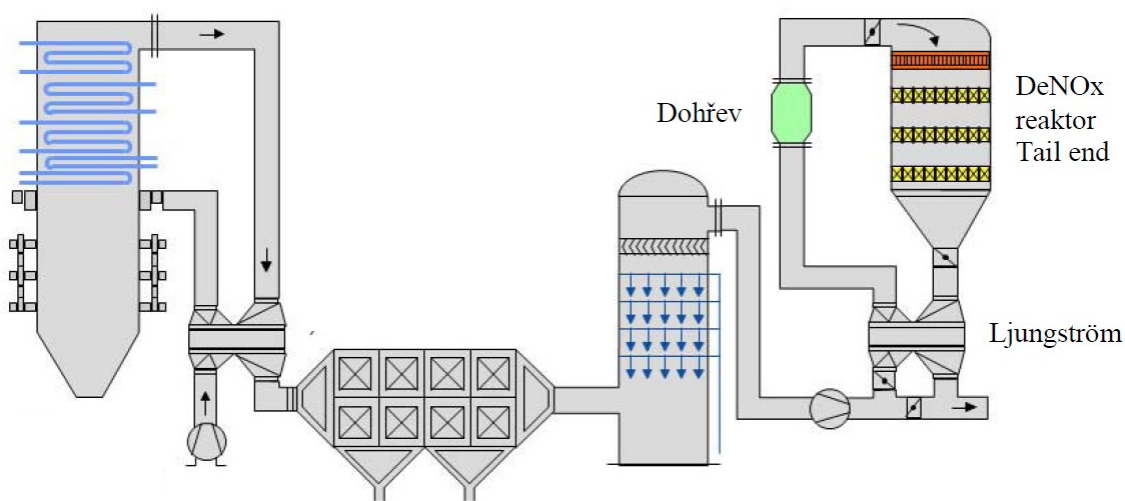
[9]

Tail end

Tento systém je známý tím, že se nemusí často měnit katalyzátory, díky čistotě spalin nedochází tak velké a časté deaktivaci modulů katalyzátoru. Čistota spalin je dána především tím, že spaliny, než jdou do katalyzátoru, prochází odsířením, což má vliv na chemickou odolnost katalyzátoru. Aby reakce byla ideální, musí mít spaliny ideální teplotu, což je největší problém u této metody. Spaliny se musí dohřívat. Po opuštění spalin odsiřovacím procesem mají spaliny teplotu okolo $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, což na reakci v katalyzátoru je málo. Na ohřev spalin se využívá regenerační výměník. Tím nejběžnějším výměníkem,

který se používá je typ Ljungström, ale díky jeho účinnosti je nutné spaliny ještě dohřívat. K tomuto dohřívání se využívá buď parní ohřev, nebo dodatečný hořák, což by vedlo k zvednutí provozních nákladů. Ačkoliv díky životnosti katalyzátorů, není tento systém tak nákladný. Výhodou tohoto typu je, že při stavbě systému Tail end, který sice zabere dost prostoru, může kotel normálně fungovat což u typu High dust nejde. Další výhodou je velikost katalyzátoru, což se projeví na jeho ceně. I přes to všechno je Tail end hodně nákladný, z důvodu mnoha potřebných zařízení. Pokud však je prostor dostatečný, budoucí náklady nebudou tak velké. Tento systém je známý svojí spolehlivostí. Na obrázku č. 24 můžeme vidět umístění systému Tail end.

Obr. č. 24 – Umístění Tail end



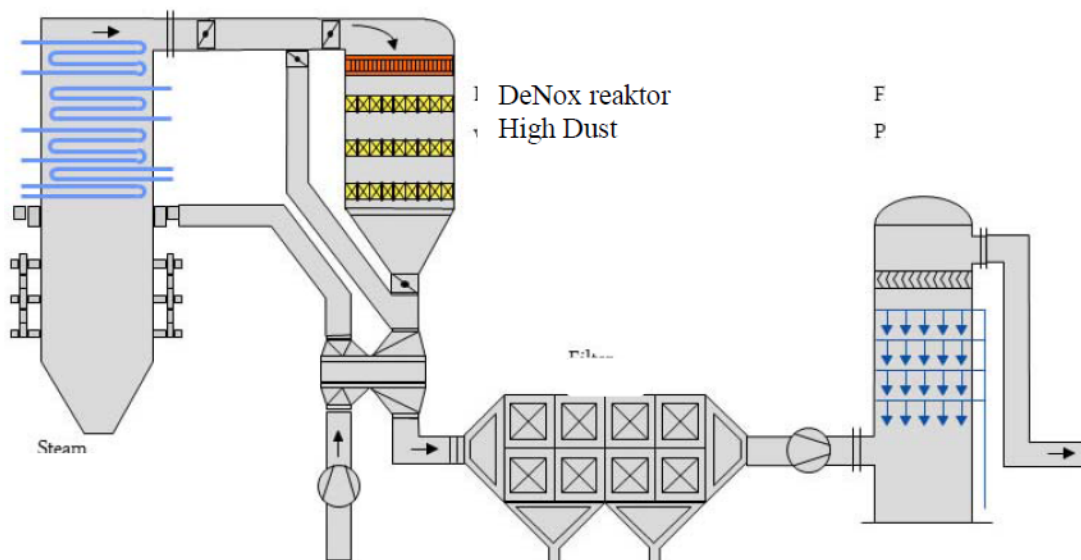
[9]

High dust

Tato SCR metoda je praktikována mezi ekonomizérem a ohřívákem vzduchu. Klíčové znaky pro tuto metodu jsou vysoký obsah tuhých částic a velká teplota spalin. U této konstrukce je nutno použít katalyzátor, který má větší otvory z důvodu zalepování popílkem. Zvětšením otvorů samozřejmě naroste i objem katalyzátoru, tím se nám zvětší reaktor i náklady na realizaci. Díky velkému množství popílku, dochází k dost velké abrazi, což vede k častější výměně katalyzátorů, než u ostatních metod. Tato metoda i dost využívána, ačkoliv je třeba zásahu do kotle. Výhoda je především vysoká teplota spalin, takže není nutný předehřev ve výměníku. Je nutné však regulovat ekonomizér, protože teplota kolísá s výkonem kotle. Nevýhodou této metody je však také složení spalin. Katalyzátor se nachází před odsiřovací jednotkou, takže ve spalinách se nachází vysoký obsah SO_2 , který má tendenci oxidovat a ve spojení s vodou vytváří kyselinu sírovou.

Kyselina sírová ve spojení se čpavkem vytváří její soli, které deaktivují katalyzátor, popřípadě způsobují korozi na teplosměnných plochách. Spaliny rovněž obsahují oxidy arsenu, které jsou také jed pro katalyzátor. Na obrázku č.25 vidíme umístění metody High dust ve spalínovém traktu.

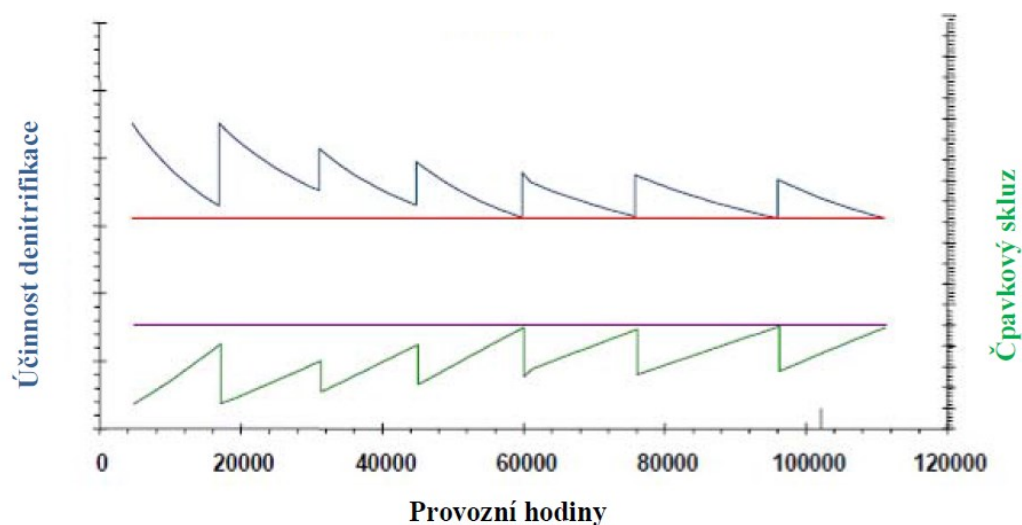
Obr. č. 25: Umístění High dust



[9]

Na obrázku č. 26 pak můžeme vidět graf společnosti STARG, která ukazuje plán katalyzátorového hospodářství metody high dust v praxi.

Obr. č. 26: Plán katalyzátorového hospodářství v provedení High dust



[9]

3 Návrh základního konceptu technologie SCR v provedení High dust

V mojí diplomové práci se zabírám návrhem konceptu SCR technologie pro denitrifikaci spalín ve variantě High Dust.

Jako základní vstupní hodnoty je zde palivo, které se bude spalovat, vstupní a výstupní koncentrace NO_x do a z reaktoru SCR ve spalínách, dále je znám průtok spalín viz Tab.č.2

Aby byla denitrifikace úspěšná, je třeba dodržet podmínky jako například teplota spalín v místě instalace katalytických vrstev, koncentrace reagentu a podobně. Tudíž kromě samotného reaktoru, budu navrhovat i způsob jak správně reagent do spalín dopravit a promíchat. V následujících odstavcích budu jednotlivé postupy rozebírat a provedu i jejich návrh.

Technologie SCR ve variantě High Dust je v základě tvořena reaktorem s katalytickými výměnnými vrstvami. Nutným pak je systémem přípravy a přívodu reagentu do proudu spalín, který zaručuje homogenní koncentrační profil před katalytickou vrstvou, je tedy nutno umístit do proudu spalín trysky přívodu reagentu a zaručit míšení reagentu se spalínami například statickým mixérem. Dále je třeba zaručit rovnoměrný rychlostní profil před vstupem do katalytických vrstev a to s ohledem jednak na doporučené rychlosti spalín v katalyzátorech a tak dále. Dalším nezbytným prvkem v proudu spalín jsou v mém případě naváděcí plechy v přechodu z vodorovného kanálu do svislé, reaktoru, před katalytickou vrstvou, které zaručují homogenní rychlostní profil spalín před vstupem do katalytické vrstvy a to s ohledem na abrazní působení popílku a čpavkový skluz.

Systém přípravy reagentu, v mém případě reagentem je čpavková voda, musí být zaručeno odpaření vody z roztoku a čpavku tak aby ve spalínách byl přítomen čpavek v plynné podobě. Navrhuji systém odpařování čpavkové vody založený na odpaření čpavkové vody v horkém vzduchu, který se pak stává i transportním médiem reagentu. Tento vzduch je připravován ve výměníku spaliny vzduch, kde atmosférický vzduch je nasáván dmychadlem a dále dopravován do výměníku spaliny vzduch, který je umístěn ve spalínách na vstupu do katalytických vrstev.

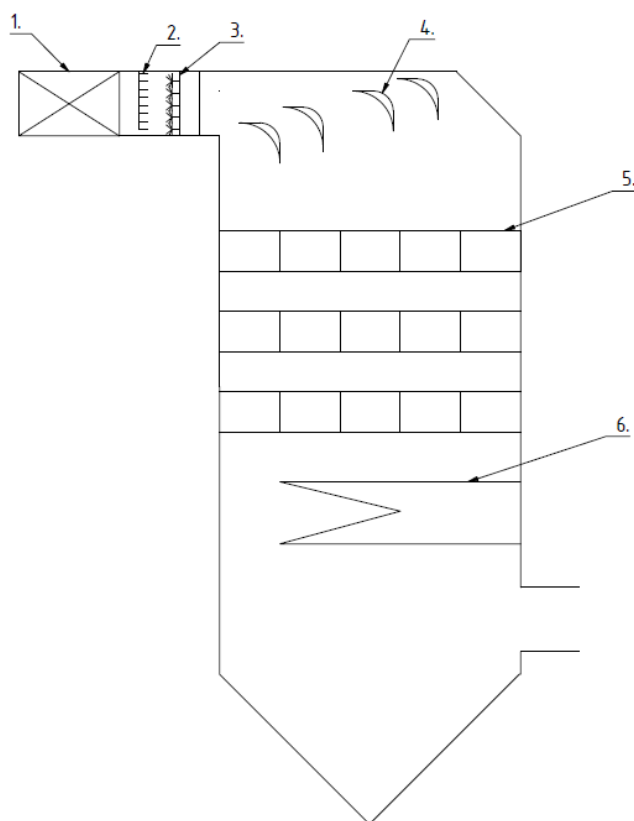
Čpavková voda je kontaktována s horkým vzduchem v průtočném kanále, kde čpavková voda je rozprašována tryskou.

Směs vzduchu, vodní páry a čpavku je pak dopravována do systému trysek, které jsou umístěny ve vodorovné části přívodního spalínového kanálu do reaktoru před statickým mixérem.

Teplotní okno, žádané pro katalytickou vrstvu, je předpokládáno, na základě konzultace s výrobcem katalyzátoru, v rozmezí 320 až 370°C.

Tuto žádanou hodnotu teploty spalin je možné, s ohledem na změny teploty spalin v druhém tahu kotle v závislosti na výkonu kotle zaručit jednak rozdělením EKO a bypassem EKA za reaktorem, jednak částečným obtokem spalin teplosměnné plochy. V mém případě předpokládám jednodušší systém obtoku teplosměnné plochy EKO I. V mé práci budu předpokládat návrhovou teplotu pro technologii SCR s ohledem na teploty v druhém tahu kotle 350°C při jmenovitých parametrech na který je navrhován koncept SCR.

Obr.č.27 - Schéma návrhu konceptu technologie SCR



Legenda: 1-výměník spaliny vzduch, 2-trysky čpavku, 3-statický mixér, 4-naváděcí plechy, 5-katalytická vrstva, 6 - EKO I

[Vlastní nákres]

Základem pro návrh SCR reaktoru je v dobrém poměru reaktantů a parametrů katalyzátoru. Mezi výchozí parametry jsou vstupní koncentrace NO_x a požadovaná koncentrace NO_x za reaktorem. V následující tabulce č. 2., jsou napsány výchozí parametry pro následující výpočty.

Tabulka č.2 – Základní parametry pro návrh katalyzátoru (dle zadání vedoucího diplomové práce pro specifický případ)

Parametry na vstupu do katalyzátoru			
Koncentrace NO_x (NO) před vstupem do katalyzátoru	$C_{\text{NO}_x, \text{vst}}$ up	500	$[\text{mg}/\text{m}_n^3]$
Objemový průtok spalin	V_{spalin}	55	$[\text{m}_n^3/\text{s}]$
Parametry na výstupu z katalyzátoru			
Koncentrace NO_x za katalyzátorem	$C_{\text{NO}_x, \text{vys}}$ tup	200	$[\text{mg}/\text{m}_n^3]$

4 Stechiometrie spalin

Pro návrh vybraných technologických uzlů je zapotřebí znát předpokládané složení spalin. Palivo pro zdroj je proplástek z Dolu Darkov. Dále mám zadanou koncentraci NO_x ve spalinách a množství spalin. V tabulce číslo 3 je prvkový rozbor paliva.

Tab.č.3 – Prvkový rozbor paliva

Surový vzorek proplátku z dolu Darkov			
Složení $[\text{KgKg}_{\text{pal}}]$			
Hmotnostní podíl uhlíku v palivu	C^r	0,464	-
Hmotnostní podíl vodíku v palivu	H^r	0,0276	-
Hmotnotní podíl síry v palivu	S^r	0,0053	-
Hmotnotní podíl dusíku v palivu	N^r	0,0071	-
Hmotnotní podíl kyslíku v palivu	O^r	0,0478	-
Hmotnotní podíl vody v palivu	W^r	0,12	-
Hmotnotní podíl popeloviny v palivu	A^r	0,373	-
Vlastnosti			
Výhřevnost surového paliva	Q_i^r	17	$[\text{MJ}/\text{kg}]$

V tabulce č. 4 jsou popsány další zadané parametry, jako například objemový tok spalin, tlak a teplota spalin. Objemový tok je v jednotkách m_n^3/s .

Tab.č.4 – Vlastnosti spalin

Předpokládané hodnoty ve spalinách			
Množství NO _x (NO) ve spalinách na vstupu do SCR	NO _x	500	[mg/m ³ _N]
Parametry spalin			
Objemový tok spalin	V _{sp}	200 000	[m ³ _N /h od]
		55	[m ³ _N /s]
Teplota spalin v reaktoru, katalytické vrstvy	t _{sp}	350	[°C]
Tlak spalin	p _{sp}	1010,25	[bar]
Obsah kyslíku ve spalinách	O ₂	8	[%]

Jako další potřebné informace, jsou napsány v tabulce č.5. Je to složení vzduchu, kterým budu spalovat zadané palivo.

Tab.č.5- Spalovací vzduch

Prvkové složení vzduchu				
Prvek	N ₂	O ₂	CO ₂	Ar
%	78,05	21	0,03	0,92

Jako první budu počítat, v rovnici č. 13., množství kyslíku, které bude potřeba na spálení jednoho kg zadaného paliva, k tomuto však budu potřebovat relativní atomové hmotnosti jednotlivých elementu paliva, ty jsou popsány v tabulce č.6.

Tabulka č. 6 – Atomové hmotnosti složek

Atomové hmotnosti		
C	12,01	[kg]
2H₂	4,032	[kg]
S	32,06	[kg]
O₂	32	[kg]
N₂	28,0013	[kg]
H₂O	18,015	[kg]
W_r	22,41	[kg]

$$V_{O_2 \min} = \frac{22,39}{12,01} \cdot 0,464 + \frac{22,39}{4,032} \cdot 0,0276 + \frac{22,39}{32,06} \cdot 0,0053 - \frac{22,39}{32} \cdot 0,0478 = 0,98854 \left[m^3_{O_2} / Kg_{pal} \right] \quad (13)$$

V rovnici č. 14. přepočítám množství kyslíku potřebného na spálení kg paliva, na množství vzduchu teoretického suchého.

$$V_{vz \min}^s = \frac{100}{21} \cdot 0,98854 = 4,707 \left[m^3_{vzd} / Kg_{pal} \right] \quad (14)$$

Z naměřeného obsahu kyslíku ve spalínách si spočítáme, s jakým přebytkem vzduchu budeme spalovat

$$\alpha = \frac{21}{21 - 7,5} = 1,615 [-] \quad (15)$$

Dále bude zapotřebí spočítat množství jednotlivých plynných složek spalin, k tomu budeme muset znát jednotlivé molární objemy daných složek. Ty najdeme v tabulce č. 7.

Tab. č. 7 – Molární objemy jednotlivých složek spalin

Molární objemy jednotlivých latek					
Typ spalin	CO₂	SO₂	N₂	Ar	H₂O
V _M	22,26	21,89	22,4	0,92	44,81

V rovnicích 16 – 19 budu počítat jednotlivé množství spalin, které vzniknou spálením 1 Kg paliva. V rovnici č. 20 budeme používat faktor relativní vlhkosti 70 % při 20 °C, který jsem si zvolil 1,016.

$$V_{CO_2 \min} = \frac{22,26}{12,01} \cdot 0,464 + \frac{0,03}{100} \cdot 4,707 = 0,8614 \left[m_{CO_2}^3 / Kg_{pal} \right] \quad (16)$$

$$V_{SO_2 \min} = \frac{21,89}{32,06} \cdot 0,0053 = 0,003618 \left[m_{SO_2}^3 / Kg_{pal} \right] \quad (17)$$

$$V_{N_2 \min} = \frac{22,4}{28,0013} \cdot 0,0071 + \frac{78,05}{100} \cdot 4,707 = 3,6797 \left[m_{N_2}^3 / Kg_{pal} \right] \quad (18)$$

$$V_{Ar \min} = \frac{0,92}{100} \cdot 4,707 = 0,0433 \left[m_{Ar}^3 / Kg_{pal} \right] \quad (19)$$

$$V_{H_2O} = \frac{44,81}{4,032} \cdot 0,0276 + \frac{22,41}{18,015} \cdot 0,12 + (1,016 - 1) \cdot 4,707 = 0,5313 \left[m_{H_2O}^3 / Kg_{pal} \right] \quad (20)$$

V rovnici č. 21 vypočítám teoretické spaliny suché a v rovnici č. 22 pak spaliny teoretické vlhké.

$$V_{sp \min}^s = 0,8614 + 0,003618 + 3,6797 + 0,043307 = 4,588 \left[m_{spal}^3 / Kg_{pal} \right] \quad (21)$$

$$V_{sp \min}^v = 4,588 + 0,5313 = 5,119 \left[m_{spal}^3 / Kg_{pal} \right] \quad (22)$$

Za pomoci přebytku vzduchu vypočítáme v rovnici č. 23 skutečný objem vlhkých spalin.

$$V_{sp} = 5,1194 + ((1,615 - 1) \cdot 4,7826) = 8,0608 \left[m_{spal}^3 / Kg_{pal} \right] \quad (23)$$

Pro další výpočty, budu potřebovat také přesné složení skutečných spalin.

$$V_{CO_2} = 0,86 + (1,615 - 1) \cdot \left(\frac{0,03}{100} \right) \cdot 4,707 = 0,86 \left[m_n^3 / Kg \right] \quad (24)$$

$$V_{SO_2} = 0,00361 \left[m_n^3 / Kg \right] \quad (25)$$

$$V_{N_2} = 3,6797 + (1,615 - 1) \cdot \left(\frac{78,05}{100} \right) \cdot 4,707 = 5,939 \left[m_n^3 / Kg \right] \quad (26)$$

$$V_{Ar} = 0,0433 + (1,615 - 1) \cdot \left(\frac{0,92}{100} \right) \cdot 4,707 = 0,699 \left[m_n^3 / Kg \right] \quad (27)$$

$$V_{H_2O} = 0,5313 + (1,615 - 1) \cdot (1,016 - 1) \cdot 4,707 = 0,577 \left[m_n^3 / Kg \right] \quad (28)$$

$$V_{O_2} = (1,615 - 1) \cdot \left(\frac{21}{100} \right) \cdot 4,707 = 0,6079 \left[m_n^3 / Kg \right] \quad (29)$$

V následujících rovnicích přepočítám skutečné množství spalin na procentuální složení jednotlivých plynných složek spalin.

$$X_{CO_2} = \frac{0,86}{8,06} \cdot 100 = 10,697[\%] \quad (30)$$

$$X_{SO_2} = \frac{0,00361}{8,06} \cdot 100 = 0,044[\%] \quad (31)$$

$$X_{N_2} = \frac{5,939}{8,06} \cdot 100 = 73,68[\%] \quad (32)$$

$$X_{Ar} = \frac{0,699}{8,06} \cdot 100 = 0,86[\%] \quad (33)$$

$$X_{H_2O} = \frac{0,577}{8,06} \cdot 100 = 7,166[\%] \quad (34)$$

$$X_{O_2} = \frac{0,6079}{8,06} \cdot 100 = 7,542[\%] \quad (35)$$

5 Návrh základních rozměrů reaktoru

Základním z návrhových parametrů reaktoru je průtočná rychlost spalin v katalytické vrstvě. Obvyklou rychlostí v katalytické vrstvě je rychlost cca 4,5m/s. Zde je třeba brát v potaz jednak parametry reakce samotné jednak abrazivitu popílku ve spalinách. Plochu reaktoru je třeba navrhnout s ohledem na dodržení této rychlosti v průtočném průřezu katalyzátoru při jmenovitých parametrech.

Dále pak jsem zvolil pro navržený koncept SCR složen ze tří katalytických vrstev, což je jeden z určujících parametrů pro výšku reaktoru.

Dalším parametrem určujícím výšku reaktoru je pak parametr zaručení rovnoměrného rychlostního pole před katalytickou vrstvou, tedy pak nutnost instalace naváděcích prvků v toku spalin.

Princip výpočtu, základní vztahy pro získání informací o výšce katalytické vrstvy jsou uvedeny níže. Pro konkrétní podmínky, tj. složení spalin a pracovní teplotu musí být navržené, výrobcem katalyzátoru, optimální chemické složení katalyzátoru a tomu pak odpovídají fyzikálně chemické parametry katalyzátoru, a to s ohledem na primární denitrifikační proces, dále na minimální možnou míru konverze SO₂/SO₃ a to s ohledem na snižování aktivity katalyzátoru vlivem jak chemické deaktivace tak i mechanické. S ohledem na tyto skutečnosti jsem zvolil obvyklý koncept tří vrstev, které pak umožňuje

efektivní "catalyst management". Předpokládám, že při nájezdu technologie budou instalovány dvě vrstvy katalyzátorů, po dosažení minima sumární aktivity těchto vrstev pak bude doložená vrstva třetí. Další pak bude, po dosažení minima sumy aktivity, výměna vrstva první ze dvou pracujících od počátku provozu. Další výměny pak budou plánovány s ohledem na jednak plánovaný "catalyst management" ale i reálný stav katalytických vrstev.

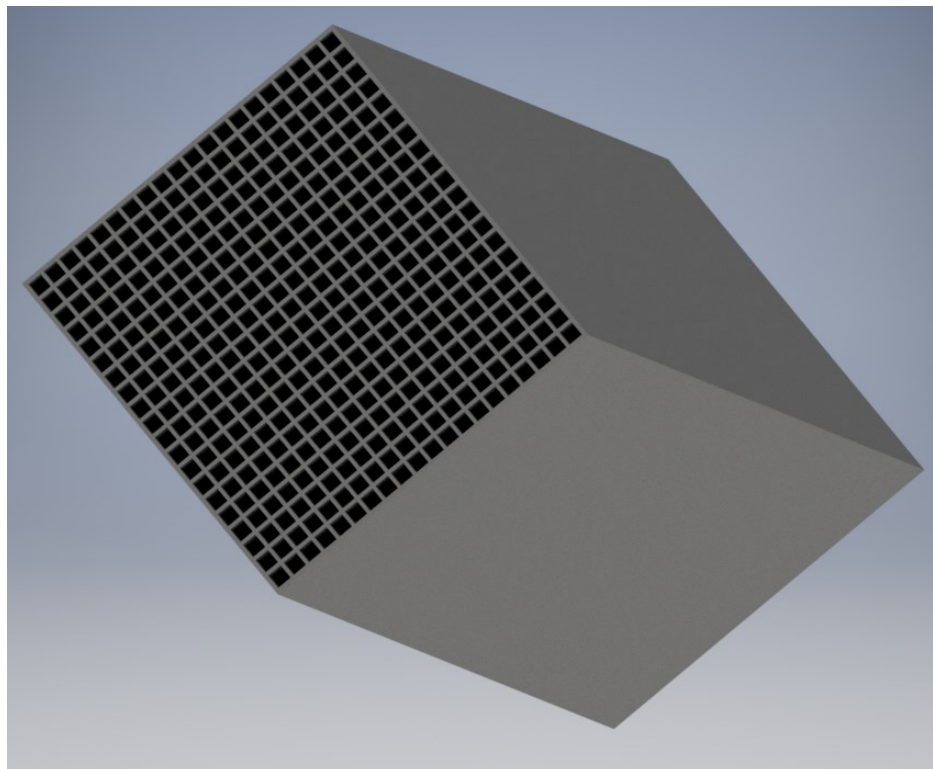
Volba základních parametrů katalyzátoru

Tab. č. 9 – Geometrické parametry elementu pro provedení High dust

Geometrické parametry elementu pro provedení High dust[19]			
Velikost elementů	150x150	[mm]	
Počet komor v jednom elementu	20x20	[-]	
Pitch	7,4	[mm]	
Tloušťka vnitřních stěn elementu	1,4	[mm]	
Tloušťka obvodových stěn elementu	1,7	[mm]	
Doporučená rychlost v katalyzátoru	5	[m/s]	
Tlaková ztráta při doporučené rychlosti	2,3	[mbar/m]	
Specifický povrch katalyzátorů	$A_{spec.}$	430	$[m^2/m^3]$

Příklad jednoho elementu můžeme vidět na obrázku č. 28.

Obr. č. 28 – Element katalyzátoru



[Vlastní nákres]

Tab. č. 10 – Parametry proudících spalin

Parametry proudících spalin			
Koncentrace NO _x	C _{NO_x}	321,71	[ppm]
Koncentrace NH ₃	C _{NH₃}	160,919	[ppm]
Objemový tok spalin efektivní	V _{sp,efek.}	116,98	[m ³ /s]

Základní vztahy pro určení reakčních parametrů a objemu katalyzátoru pak jsou uvedeny níže.

$$V'_{kat} = \frac{-(V_{sp,efek.}^V \cdot \ln(1 - \eta_{NO_x, kat}))}{K_{kat} \cdot A_{spec.}} \quad (36)$$

Rychlostní konstanta reakce:

$$k = k_0 \cdot e^{\frac{-E_A}{R \cdot T}} \quad (37)$$

Pravděpodobnostní konstanta reakce:

$$a = a_0 \cdot e^{\frac{-A}{R \cdot T}} \quad (38)$$

Aktivační konstanta katalyzátoru při původní aktivitě katalyzátoru:

$$K_{kat} = k \cdot C_{NO_x} \cdot \frac{a \cdot C_{NH_3}}{1 + a \cdot C_{NH_3}} \quad (39)$$

Objem katalyzátoru z rovnice č. 36:

U velikosti objemu katalyzátoru však jde o dobu setrvání látek v něm. Naše doporučená rychlost je zvolen pro jmenovité parametry průtoku spalin 5 m/s, Abych měl optimální rychlost, volím spalinový kanál o velikosti 7,6 x 5,03m. Průtočná plocha kanálu S_{sp} je tedy 37,62 m². Skutečná plocha, kterou zaujímá katalyzátor je menší, protože tam jsou další konstrukční prvky. Proto přidávám ještě 15 % navíc plochy.

$$\begin{aligned} S'_{kat} &= \frac{S_{sp}}{1,15} \\ S'_{kat} &= \frac{37,62}{1,15} \\ S'_{kat} &= 32,7 [m^2] \end{aligned} \quad (40)$$

Průtočná plocha, kterou má katalyzátor lze vypočítat pomocí poměru, který je uveden v tabulce č.9.

$$\begin{aligned} S_{pr} &= S_{sp} \cdot 0,64762 \\ S_{pr} &= 37,62 \cdot 0,6394 \\ S_{pr} &= 24,05 [m^2] \end{aligned} \quad (41)$$

Rychlost katalyzátorem se pak dá vypočíst jako efektivní průtok objemu spalin a průtočné plochy.

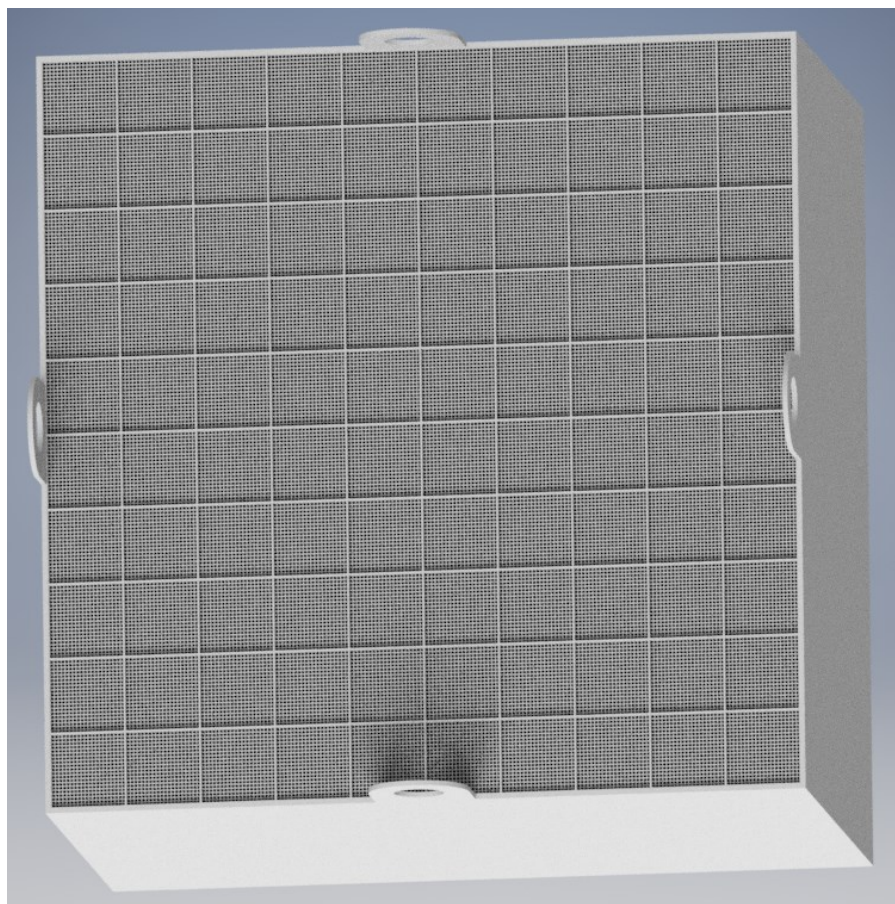
$$\begin{aligned} w_{sp} &= \frac{V_{sp.efek}}{S_{pr}} \\ w_{sp} &= \frac{116,95}{24,05} \\ w_{sp} &= 4,86 [m / s] \end{aligned} \quad (42)$$

Plná plocha katalyzátoru bez kanálků, pak vypočtu jako rozdíl mezi plochou, kterou zabírá katalyzátor a plochou průtočnou.

$$\begin{aligned} S_{kat} &= S'_{kat} - S_{pr} \\ S_{kat} &= 32,7 - 24,05 \\ S_{kat} &= 8,65 [m^2] \end{aligned} \quad (43)$$

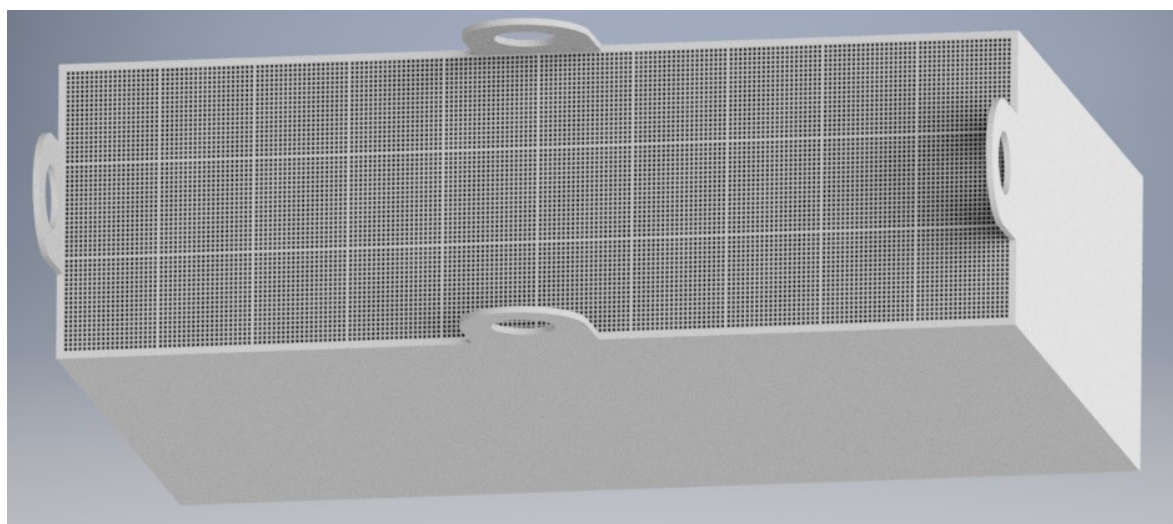
Můj katalyzátor jsem poskládal z jednotlivých boxů, aby se s nimi mohlo lépe manipulovat při výměně. Boxy mám o velikosti 1,5 x 1,5 m a 1,5 x 0,45 m. Boxy můžeme vidět na obrázcích 29 a 30.

Obr. 29 – Větší box



[Vlastní nákres]

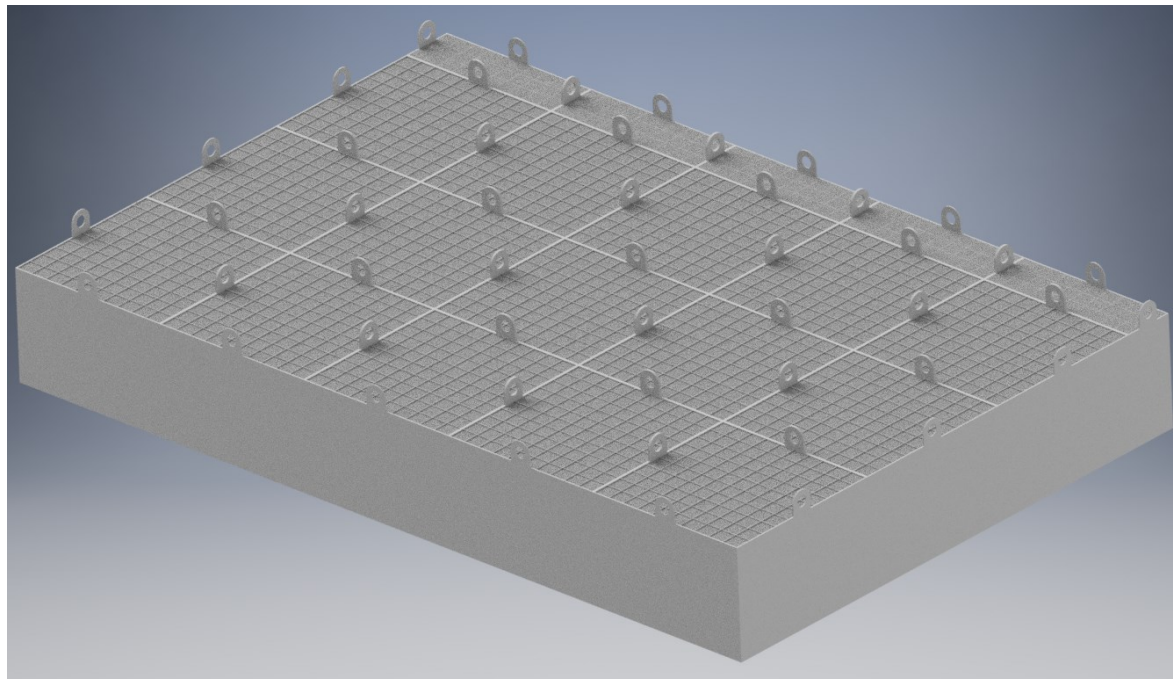
Obr. 30 - Menší box



[Vlastní nákres]

Z 15 větších boxů a 5 menších jsem poskládal katalytickou vrstvu, která je na obrázku č.31

Obr. č. 31 – Katalytická vrstva



[Vlastní nákres]

Výpočet spotřeby reagentu

Hmotnostní tok NO_x na vstupu do katalyzátoru:

$$m_{\text{NO}_x \text{ vstup}} = C_{\text{NO}_x \text{ vstup}} \cdot V_{\text{spalin}}$$

$$m_{\text{NO}_x \text{ vstup}} = 500 \cdot 55$$

$$m_{\text{NO}_x \text{ vstup}} = 27500 [\text{mg/s}] \quad (44)$$

Hmotnostní tok NO_x na výstupu z katalyzátoru:

$$m_{\text{NO}_x \text{ vystup}} = C_{\text{NO}_x \text{ vystup}} \cdot V_{\text{spalin}}$$

$$m_{\text{NO}_x \text{ vystup}} = 200 \cdot 55$$

$$m_{\text{NO}_x \text{ vystup}} = 11000 [\text{mg/s}] \quad (45)$$

Pro návrh katalyzátoru a redukční rovnice je důležité vypočítat účinnost, s jakou redukuje katalyzátor množství NO_x . Tato účinnost se vypočte jako poměr množství NO_x na výstupu z katalyzátoru a NO_x na vstupu do katalyzátoru.

$$\eta_{\text{NO}_x \text{ kat}} = \frac{m_{\text{NO}_x \text{ vstup}} - m_{\text{NO}_x \text{ vystup}}}{m_{\text{NO}_x \text{ vstup}}}$$

$$\eta_{NO_x kat} = \frac{27500 - 11000}{27500}$$

$$\eta_{NO_x kat} = 0,6 \quad (46)$$

Dále budu počítat stechiometrický molární poměr SR čpavku a oxidů dusíku, kdy dojde k ideální přeměně NO_x na vodu a dusík. Budu počítat s reakcí, která je popsána v předchozí rovnici č. 4, kde reaguje NO s NH_3 , protože spaliny obsahují z velké většiny NO.



Molární tok oxidů dusíků na vstupu do katalyzátoru:

$$n_{NO_x vstup} = \frac{m_{NO_x vstup}}{M_{NO_x}}$$

$$n_{NO_x vstup} = \frac{27500}{1000 \cdot 31}$$

$$n_{NO_x vstup} = 0,88 [mol/s] \quad (47)$$

Molární tok oxidů dusíku k odstranění:

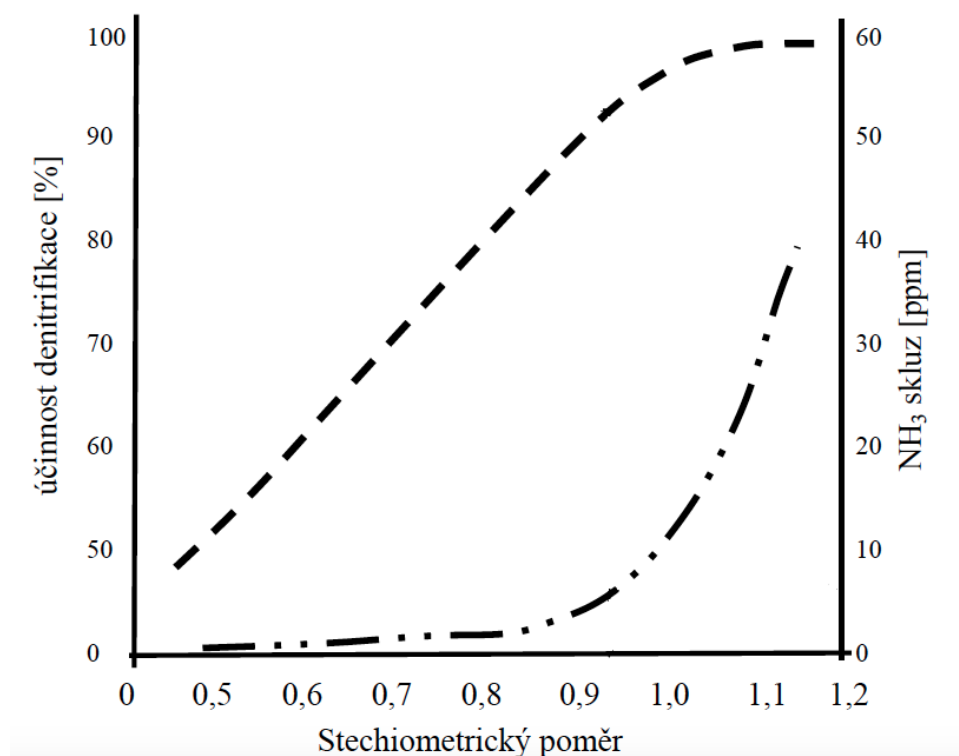
$$n_{NO_x odstranění} = \frac{m_{NO_x vstup} - m_{NO_x vystup}}{M_{NO_x}}$$

$$n_{NO_x vystup} = \frac{27500 - 11000}{1000 \cdot 31}$$

$$n_{NO_x vystup} = 0,532 [mol/s] \quad (48)$$

Stechiometrický poměr reakce čpavku s NO_x bude 1 nebo pod 1. To se však neděje lineárně, protože po úbytku reaktantů při prvotní srážce se snižuje šance další reakce. Na obrázku č. 32 je graf, příklad závislosti účinnosti denitrifikace a čpavkového skluzu, na skutečném stechiometrickém poměru.

Obr. č. 32 – Závislost účinnosti denitrifikace a čpavkového skluzu na stechiometrickém poměru



[9]

Dále bude potřeba vypočítat hmotnostní tok čpavkové vody. V další kapitole budu počítat výměník tepla na ohřev transportního vzduchu na teplotu 300 °C, tak aby zde došlo k vypaření této čpavkové vody. Jako reagent pro snížení oxidu dusíku, budu používat čpavkovou vodu o koncentraci čpavku 25 %.

Hmotnostní tok čpavku:

$$m_{NH_3} = n_{NH_3} \cdot M_{NH_3} \cdot 1000$$

$$m_{NH_3} = 0,532 \cdot 17,09 \cdot 1000$$

$$m_{NH_3} = 9091,88 [mg/s]$$

(50)

Hmotnostní tok čpavkové vody:

$$m_{\diamond NH_3} = \frac{m_{NH_3}}{0,25}$$

$$m_{\diamond NH_3} = \frac{9091,88}{0,25}$$

$$m_{\diamond NH_3} = 36367,52 [mg/s]$$

(51)

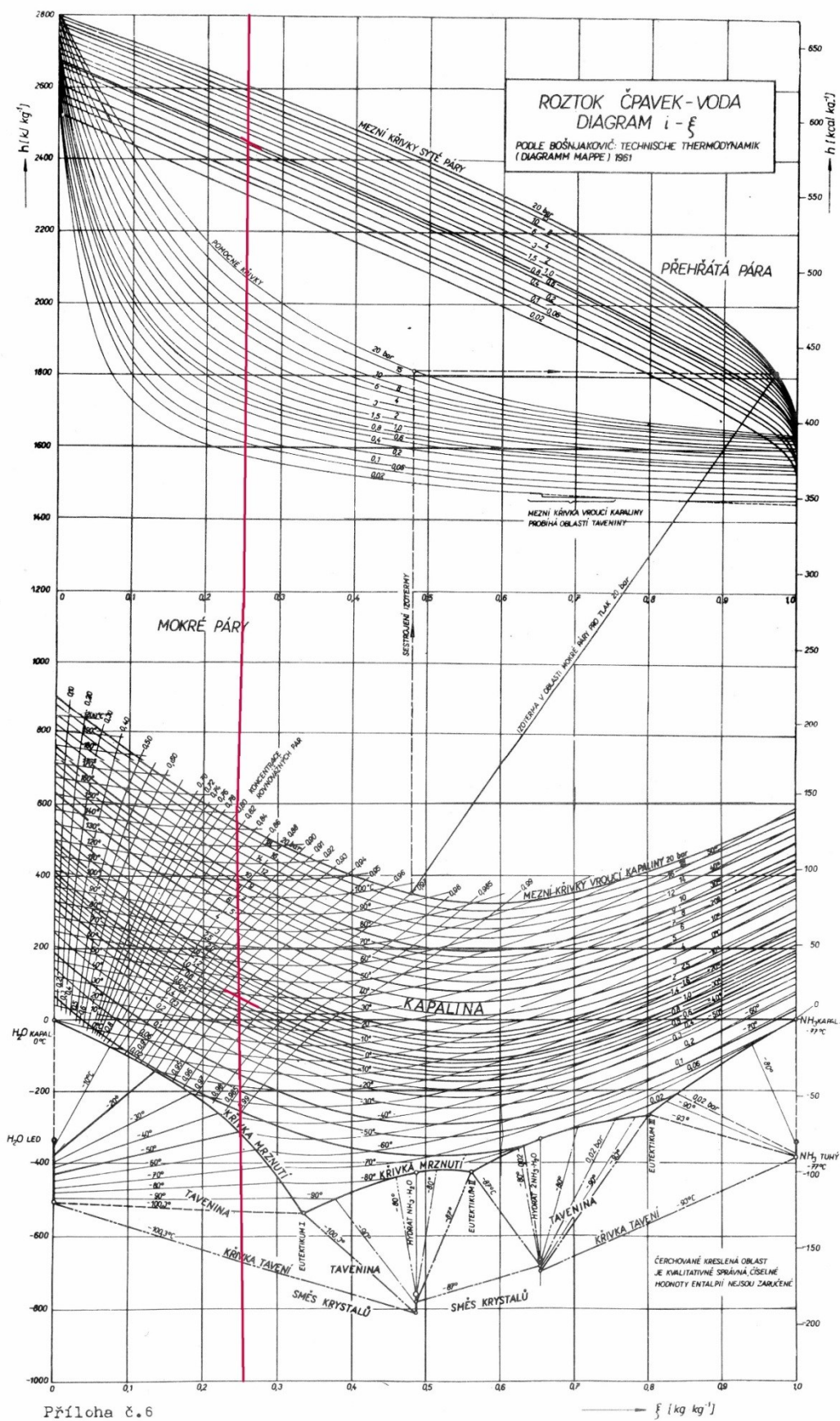
6 Návrh systému přípravy reagentu pro injektáž do spalín

K vypaření čpavkové vody budu potřebovat, dle mnou zvoleného konceptu, horký vzduch, předpokládám teplotu vzduchu o teplotě cca 300 °C, který získám ohřevem atmosférického vzduchu ve výměníku tepla vzduch spaliny. Vzniklá směs ve vypařovacím díle o složení vzduch, vodní pára a čpavek bude pak obsahovat dle mého návrhu 5 % čpavku.

Teplota a tok vzduchu do vypařovacího reaktoru musí zaručit odpaření čpavkové vody a dosažení teploty plynné směsi vzduchu, vodní páry a čpavku bezpečně nad teplotou rosného bodu v potrubí dávkování reagentu do spalín.

Pro navržené parametry teploty a koncentrace čpavkové vody, vzduchu a čpavku v plynné směsi, jsou použity data z podkladů pro čpavkovou vodu viz graf č 33 a z programu EES, Výsledná teplota plynné směsi za směřovací reaktorem je cca 81°C.

Obr.č.33-Graf roztok čpavek voda



[i-s diagram podle Bošnjaković Technische Thermodynamik]

Dále navrhuji jako součást systému ohřevu vzduchu elektrický ohřívák vzduchu, který bude zařazen paralelně k potrubí horkého vzduchu na výstupním potrubí vzduchu za výměníkem. Tento ohřev zaručí dodržení teploty směsi čpavku, vzduchu a vodních par nad rosným bodem i v přechodových stavech. Systém bude opatřen systémem regulačních klappek pro řízení toku přes výměník.

Za prvé vypočtu tok vzduchu do komory, kde se bude vypařovat čpavková voda, což budu potřebovat na výpočet výměníku.

Hmotnostní tok vzduchu:

$$\begin{aligned}
 m_{vzd} &= \frac{m_{NH_3} \cdot 95}{5} \\
 m_{vzd} &= \frac{9091,88 \cdot 95}{5} \\
 m_{vzd} &= 172745,72 \left[\frac{mg}{s} \right] = 0,173 [kg/s]
 \end{aligned} \tag{52}$$

Při výpočtu výměníku budu počítat s množstvím nasávaného vzduchu, jehož teplota bude 20 °C při atmosferickém tlaku. V následujícím výpočtu, převedu hmotnostní tok vzduchu na objemový, přičemž pomocí programu EES jsem si zjistil vlastností vzduchu, jeho hustotu. nemělo by to být v normálních ...

Objemový tok vzduchu:

$$\begin{aligned}
 V_{vzd} &= \frac{m_{vzd}}{\rho_{vzd}} \\
 V_{vzd} &= \frac{0,173}{1,205} \\
 V_{vzd} &= 0,143 [m_n^3/s]
 \end{aligned} \tag{53}$$

Hmotnostní tok vzduchu se čpavkem do spalín:

$$\begin{aligned}
 m_{vzd+NH_3} &= \frac{m_{NH_3}}{0,05} \\
 m_{vzd+NH_3} &= \frac{9091,88}{0,05} \\
 m_{vzd+NH_3} &= 181837,6 [mg/s] = 0,182 [Kg/s]
 \end{aligned} \tag{54}$$

Pro zjištění přesné hodnoty toku vzduchu proudícího do komory, musím si převést tok spalín normálních na efektivní, dříve však musím přičíst ke spalínám tok vzduchu s amoniakem, abych měl přesný výsledek.

Hustota při 5 % směsi amoniaku se vzduchem:

$$\begin{aligned}\rho_{směsivzd+NH_3} &= \rho_{NH_3} \cdot \frac{5}{100} + \rho_{vzd} \cdot \frac{95}{100} \\ \rho_{směsivzd+NH_3} &= 0,7161 \cdot \frac{5}{100} + 1,205 \cdot \frac{95}{100} \\ \rho_{směsivzd+NH_3} &= 1,180555 [Kg / m^3]\end{aligned}\tag{55}$$

Objemový tok vzduchu s amoniakem a vodní pára???!

$$\begin{aligned}V_{smesvzd+NH_3} &= \frac{m_{vzd}}{\rho_{vzd}} \\ V_{smesvzd+NH_3} &= \frac{0,182}{1,180555} \\ V_{smesvzd+NH_3} &= 0,154 [m^3/s]\end{aligned}\tag{56}$$

7 Návrh výměníku tepla vzduch spaliny

Abych mohl získat pro injektáž plynný čpavek z čpavkové vody, musím čpavkovou vodu vypařit, toto provedu ve směšovacím výměníku, kde druhým médiem je horký vzduch. Navrhuji výstupní teplotu horkého vzduchu na 300 °C, díky kterému se čpavek z vody vypaří.

K ohřátí toho vzduchu volím trubkový výměník spaliny vzduch. Vzduch budu nasávat z okolí. Tento výměník umístím do spalinového traktu před trysky přivádějící čpavek do spalin. V této kapitole se budu zabírat jeho návrhem. Jako vstupní teplotu spalin mám 350 °C, vstupní teplota vzduchu je 20 °C a jediné co neznám je teplota spalin na výstupu z výměníku. Tuto teplotu si spočítám v následující rovnici. Kdy C_p vzduchu je 1,019 kJ/K·kg a C_p spalin si zjistíme z následující tabulky č. 12, kde jsou jednotlivé měrné tepelné konstanty jednotlivých plynných složek spalin.

Tabulka č.12 - Měrná tepelná kapacita jednotlivých plynných složek

Měrná tepelná kapacita jednotlivých plynných složek		
CO ₂	1,089	[kJ/K·kg]
SO ₂	0,7742	[kJ/K·kg]
N ₂	1,08	[kJ/K·kg]
Ar	0,5206	[kJ/K·kg]
H ₂ O	2,04	[kJ/K·kg]
O ₂	1,008	[kJ/K·kg]

$$\begin{aligned}
 Cp_{sp} &= 1,089 \cdot \frac{10,697}{100} + 0,7742 \cdot \frac{0,0449}{100} + 1,08 \cdot \frac{73,682}{100} + \\
 &0,5206 \cdot \frac{0,868}{100} + 2,04 \cdot \frac{7,166}{100} + 1,008 \cdot \frac{7,542}{100} \\
 Cp_{sp} &= 1,14 \text{ [kJ / K·kg]}
 \end{aligned} \tag{58}$$

$$\begin{aligned}
 V_{vzd} \cdot cp_{vzd} \cdot (300 - 20) &= V_{sp} \cdot cp_{sp} \cdot (350 - t_{2sp}) \\
 t_{2sp} &= 350 - \frac{V_{vzd} \cdot cp_{vzd} \cdot (300 - 20)}{V_{sp} \cdot cp_{sp}} \\
 t_{2sp} &= 350 - \frac{0,143 \cdot 1,019 \cdot (300 - 20)}{55 \cdot 1,14} \\
 t_{2sp} &= 349 \text{ [}^\circ\text{C]}
 \end{aligned} \tag{59}$$

Tab. č.13– Teploty spalin a vzduchu ve výměníku

Teploty spalin a vzduchu na vstupu a výstupu z výměníku			
Teplota spalin do výměníku	t _{1sp}	350	[°C]
Teplota spalin z výměníku	t _{2sp}	349	[°C]
Teplota vzduchu do výměníku	t _{1vz}	20	[°C]
Teplota vzduchu z výměníku	t _{2vz}	300	[°C]

V následující rovnici vypočítáme výkon výměníku.

$$P_{\text{výměníku}} = V_{vzd} \cdot (cp_0^{300} \cdot t_{2vz} - cp_0^{20} \cdot t_{1vz}) \tag{60}$$

$$P_{\text{výměníku}} = 0,143 \cdot (1,317 \cdot 300 - 1,298 \cdot 20)$$

$$P_{výmeníku} = 52,73[kW]$$

Strana spalin:

Na straně spalin budu počítat jejich střední teplotu. V tabulce č. 14 je vypsána kinematická viskozita, Prantlovo kritérium a tepelná vodivost jednotlivých složek spalin, abych zjistil podle procentuálního obsahu, jaké budou vlastnosti spalin.

Tab. č. 14 – Vlastnosti plynných složek spalin

Vlastnosti jednotlivých složek spalin			
Složka	Kinematická viskozita[m ² /s]	Prantlovo kritérium [-]	Tepelná vodivost[W/m·K]t
CO ₂	$3,364 \cdot 10^{-5}$	0,7243	0,04341
SO ₂	$2,078 \cdot 10^{-5}$	0,02012	1
N ₂	$5,559 \cdot 10^{-5}$	0,7107	0,04613
Ar	$5,147 \cdot 10^{-5}$	0,664	0,03142
H ₂ O	$6,357 \cdot 10^{-5}$	0,9324	0,04895
O ₂	$5,717 \cdot 10^{-5}$	0,731	0,04915

Výpočet kinematické viskozity, prantlova kritéria a tepelné vodivosti spalin dele procentuálního obsahu jednotlivých složek ve spalinách.

$$\begin{aligned}
 \nu_{sp} &= 3,364 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{10,697}{100} + 2,078 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{0,0449}{100} + 5,559 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{73,682}{100} + \\
 &5,147 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{0,868}{100} + 6,357 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{7,166}{100} + 5,717 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{7,542}{100} \quad (57) \\
 \nu_{sp} &= 5,399 \cdot 10^{-5} \left[m^2 / s \right]
 \end{aligned} \tag{61}$$

$$\begin{aligned} Pr_{sp} &= 0,7243 \cdot \frac{10,697}{100} + 0,02012 \cdot \frac{0,0449}{100} + 0,7107 \cdot \frac{73,682}{100} \\ &+ 0,664 \cdot \frac{0,868}{100} + 0,9324 \cdot \frac{7,166}{100} + 0,731 \cdot \frac{7,542}{100} \quad (58) \end{aligned} \quad (62)$$

$$Pr_{sp} = 0,7283[-]$$

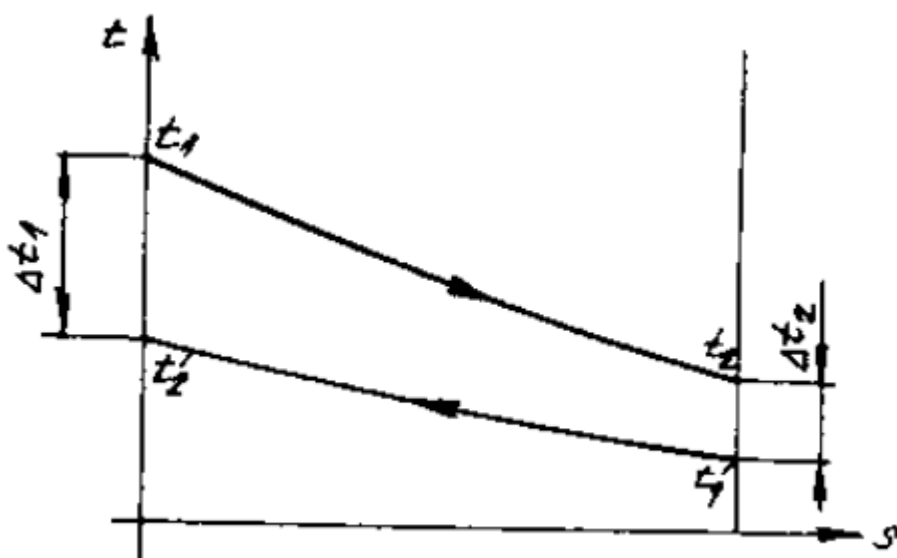
$$\begin{aligned} \lambda_{sp} &= 0,04341 \cdot \frac{10,697}{100} + 1 \cdot \frac{0,0449}{100} + 0,04613 \cdot \frac{73,682}{100} + \\ &0,03142 \cdot \frac{0,868}{100} + 0,04895 \cdot \frac{7,166}{100} + 0,04915 \cdot \frac{7,542}{100} \quad (59) \end{aligned} \quad (63)$$

$$\lambda_{sp} = 0,0465[W / m \cdot K]$$

Strana vzduchu:

Na straně vzduchu začnu první počítat jednotlivé rozdíly teplot na jedné a druhé straně.
Na obrázku č. 34 vidíme, které teploty budeme od sebe odčítat.

Obr.34 – Graf protiproudého výměníku



$$\begin{aligned} \Delta t_1 &= t_{1sp} - t_{2vzd} \\ \Delta t_1 &= 350 - 300 \\ \Delta t_1 &= 50[^\circ C] \end{aligned} \quad (64)$$

$$\begin{aligned} \Delta t_2 &= t_{2sp} - t_{1vzd} \\ \Delta t_2 &= 349 - 20 \\ \Delta t_2 &= 329[^\circ C] \end{aligned} \quad (65)$$

Dále budu počítat střední logaritmický rozdíl pro protiproudý výměník, ale protože můj výměník je křížový. Musím vynásobit střední logaritmický rozdíl pro protiproudý výměník korekčním faktorem, který zjistíme z následujícího grafu.

$$P = \frac{t_{2vzd} - t_{1vzd}}{t_{1sp} - t_{1vzd}}$$

$$P = \frac{300 - 20}{350 - 20}$$

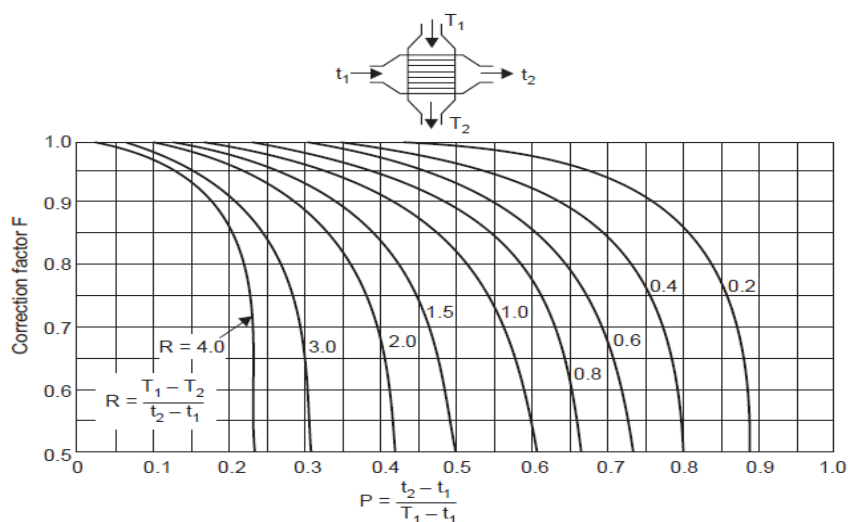
$$P = 0,85$$
(66)

$$R = \frac{t_{1sp} - t_{2sp}}{t_{2vzd} - t_{1vzd}}$$

$$R = \frac{350 - 349}{300 - 20}$$

$$R = 0,0038$$
(67)

Obr.35 – Korekční faktor F pro křížové výměníky



[24]

Po propočítání R a P volím korekční faktor 1.

$$\Delta t_{stř} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \cdot F$$

$$\Delta t_{stř} = \frac{50 - 329}{\ln \frac{50}{329}} \cdot 1$$

$$\Delta t_{stř} = 148 [^{\circ}C]$$
(68)

Střední teplota média ve výměníku.

$$t_{stř} = \frac{t_{1vzd} + t_{2vzd}}{2}$$

$$t_{stř} = \frac{300 + 20}{2}$$

$$t_{stř} = 160 [^{\circ}\text{C}]$$
(69)

V tabulce č. 10 jsou vlastnosti vzduchu nasávaného při jeho střední teplotě. Rychlost spalin v trubce volím 8 m/s

Tab. č. 15- Vlastnosti vzduchu při 160 °C.

Hodnoty vzduchu při 160 °C		
ρ_{vzd}	0,8147	[kg/m ³]
$C_{p_{vzd}}$	1,019	[kJ/kg·K]
v_{vzd}	0,00000666	[m ² /s]
λ_{vzd}	0,03566	[w/m·K]
Pr_{vzd}	0,698	[-]
W_{vzd}	10	[m/s]

Jak jsem již počítal, množství vzduchu, které bude proudit výměníkem, bude 0,116 kg/s. Přes hustotu si pak přepočtu množství vzduchu protékajícího v l/s.

$$Q = \frac{m_{vzd}}{\rho_{vzd}}$$

$$Q = \frac{0,173}{0,8147}$$

$$Q = 0,212 [l / s]$$
(70)

Dle ČSN 42 5715 volím bezešvé ocelové trubky:

Tab. č. 16 - Bezešvé ocelové trubky

Trubka			
Vnější průměr	D	0,07	[m]
Vnitřní průměr	d	0,0636	[m]
Délka trubky	l	4,6	[m]

Výpočet součinitele přestupu tepla

Dále budu počítat součinitel přestupu tepla konvekcí pro proudění vzduchu v trubce(

$$\begin{aligned}\alpha_{k1} &= 0,023 \cdot \frac{\lambda_{vzd}}{d} \cdot \left(\frac{w_{vzd} \cdot d}{\nu_{vzd}} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}_{vzd}^{0,4} \\ \alpha_{k1} &= 0,023 \cdot \frac{0,03566}{0,06473} \cdot \left(\frac{10 \cdot 0,0636}{0,0000666} \right)^{0,8} \cdot 0,698^{0,4} \\ \alpha_{k1} &= 107,64 \left[W / m^2 \cdot K \right]\end{aligned}\quad (71)$$

[25]

Součinitel přestupu tepla konvekcí pro příčné obtékání trubek:

$$\begin{aligned}\alpha_{k2} &= C_z \cdot C_s \cdot \frac{\lambda_{sp}}{D} \cdot \left(\frac{W_{sp} \cdot D}{\nu_{sp}} \right)^{0,65} \cdot \text{Pr}_{sp}^{0,33} \\ \alpha_{k2} &= 0,2 \cdot 0,945 \cdot 0,3498 \cdot \frac{0,0465}{0,07} \cdot \left(\frac{15 \cdot 0,07}{0,00005399} \right)^{0,65} \cdot 0,7283^{0,33} \\ \alpha_{k2} &= 14,82 \left[W / m^2 \cdot s \right]\end{aligned}$$

[25]

Reynoldsovo číslo:

$$\begin{aligned}\text{Re} &= \frac{W_{sp} \cdot D}{\nu_{sp}} \\ \text{Re} &= \frac{15 \cdot 0,07}{0,00005399} \\ \text{Re} &= 9075,273\end{aligned}\quad (72)$$

Příčná vzdálenost os trubek, kdy σ_1 si volím 4 :

$$\begin{aligned}S_1 &= \sigma_1 \cdot D \\ S_1 &= 4 \cdot 0,07 \\ S_1 &= 0,28 [m]\end{aligned}\quad (73)$$

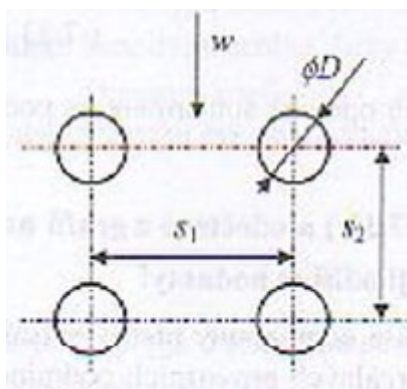
Korekční součinitel C_z pro $z < 10$ a $\sigma_1 \geq 3$, přičemž Z si volím 6.

$$\begin{aligned}C_z &= 4 \cdot z^{0,02} - 3,2 \\ C_z &= 4 \cdot 6^{0,02} - 3,2 \\ C_z &= 0,946 [-]\end{aligned}\quad (74)$$

Podélná vzdálenost os trubek, kdy σ_2 si volím 2:

$$\begin{aligned}
S_2 &= \sigma_2 \cdot D \\
S_2 &= 2 \cdot 0,07 \\
S_2 &= 0,14[m]
\end{aligned}
\tag{75}$$

Obr. č. 36 – Rozmístění trubek



[25]

Korekční součinitel C_s pro $0,1 < \phi_\sigma \leq 1,7$, kdy si ϕ_σ volím 1,33:

$$\begin{aligned}
C_s &= 0,34 \cdot \phi_\sigma^{0,1} \\
C_s &= 0,34 \cdot 1,33^{0,1} \\
C_s &= 0,3498[-]
\end{aligned}
\tag{76}$$

Poměrná úhlopříčná rozteč:

$$\begin{aligned}
\sigma'_2 &= \sqrt{0,25 \cdot \sigma_1^2 + \sigma_2^2} \\
\sigma'_2 &= \sqrt{0,25 \cdot 4^2 + 2^2} \\
\sigma'_2 &= 2,828[-]
\end{aligned}
\tag{77}$$

Parametr ϕ :

$$\begin{aligned}
\phi &= \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma'_2 - 1} \\
\phi &= \frac{4 - 1}{2,828 - 1} \\
\phi &= 1,641
\end{aligned}
\tag{78}$$

Součinitel prostupu tepla:

$$k = \frac{\pi}{\frac{1}{\alpha_{k1} \cdot d} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} + \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{\alpha_{k2} \cdot D}}$$

$$k = \frac{3,14}{\frac{1}{107,64 \cdot 0,0636} + \frac{1}{2 \cdot 50} \cdot \ln \frac{0,07}{0,0636} + \frac{1}{14,82 \cdot 0,07}}$$

$$k = 2,82 [W / m \cdot K]$$
(79)

Celková délka trubky:

$$L = \frac{P_T \cdot 1000}{k \cdot \Delta t_{stř}}$$

$$L = \frac{52,73 \cdot 1000}{2,89 \cdot 148,9}$$

$$L = 125,89 [m]$$
(80)

Počet trubek:

$$n_{trubek} = \frac{L}{l}$$

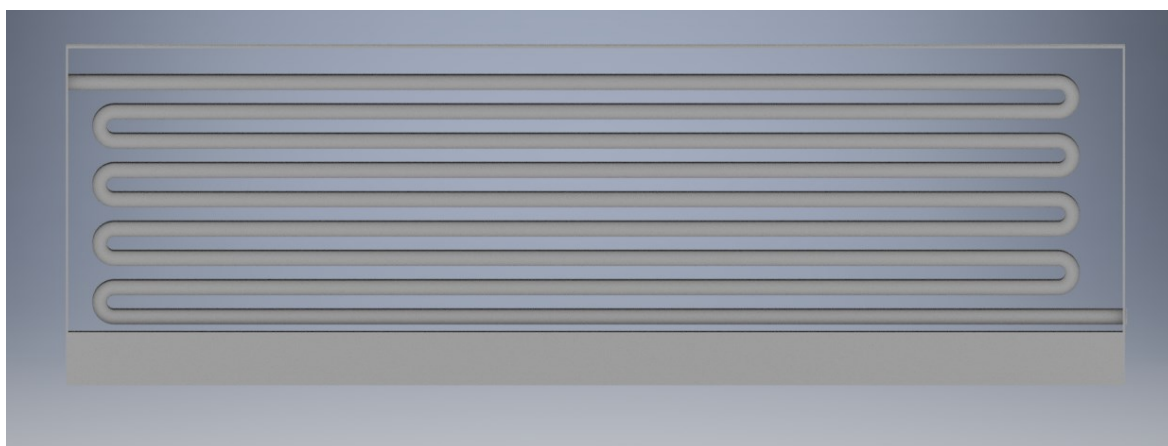
$$n_{trubek} = \frac{125,89}{4,5}$$

$$n_{trubek} = 27,97 [ks]$$
(81)

Počet trubek volím 36. pak máte větší výkon výměníku, resp teplotu.

Na obrázku č. 37 je model navrženého výměníku.

Obr.č.37- Navržený Výměník



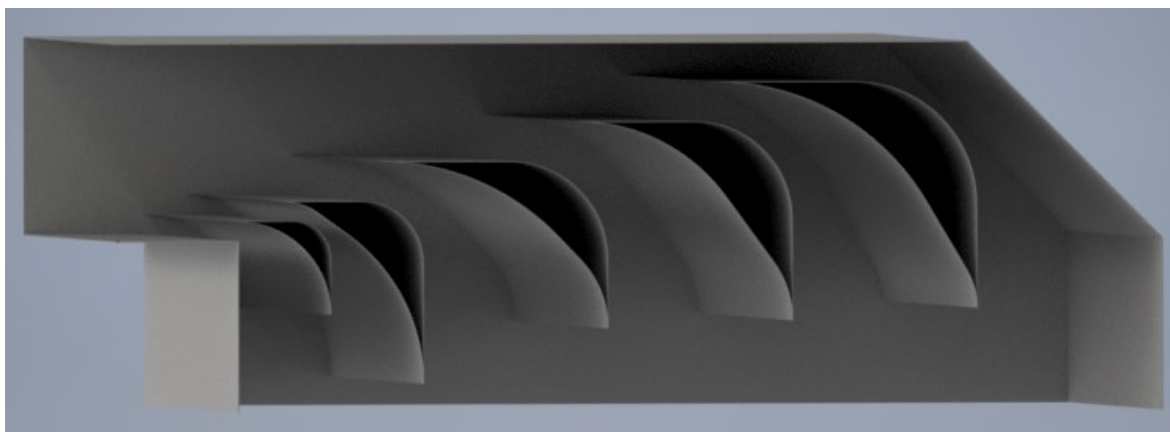
[Vlastní nákres]

8 Návrh naváděcích ploch

Pro zaručení optimálního rychlostního pole před katalytickou vrstvou, což je nutná podmínka pro správnou funkci katalyzátoru s ohledem na jednak čpavkový skluz jednak na minimalizace abrazi, je zapotřebí navrhnout usměrňovací, naváděcí prvky, které budou vloženy do proudu spalin.

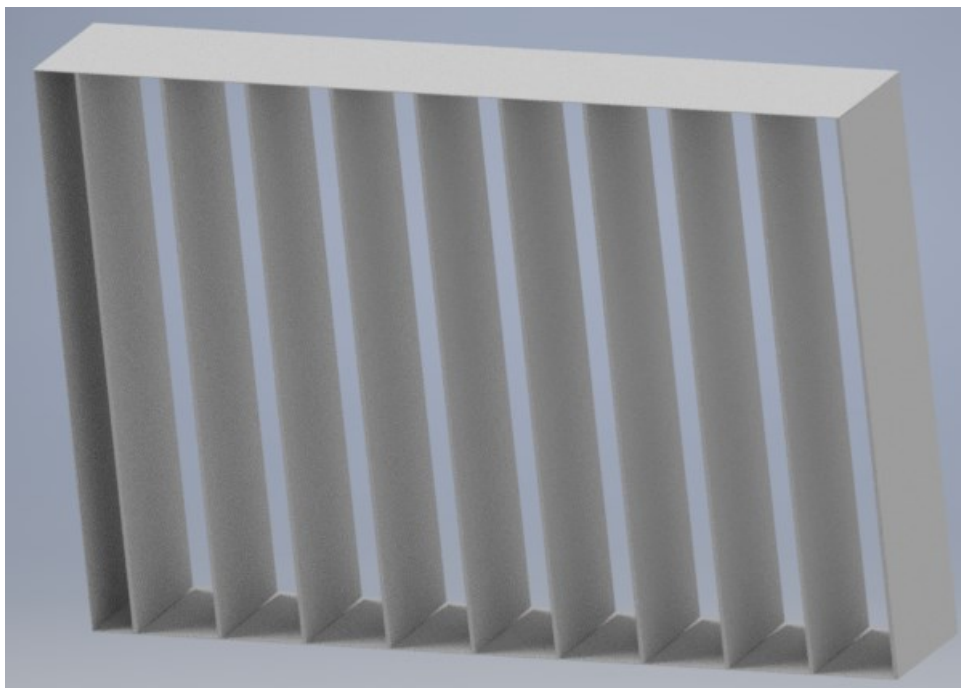
V první fázi jsem vytvořil simulaci proudění v relevantním místě, přechodu z vodorovné části kanálu do svislé, po vstup do katalytické vrstvy bez usměrňovacích prvků. V druhé fázi jsem navrhl řadu usměrňovacích prvků, kde tyto byly testovány v modelu, jako optimální řešení se jeví řešení skládající se z 5 naváděcí lopatky navrženého tvaru viz. obrázek č. 38 a svislé naváděcí plechy viz Obr.č.39

Obr. 38 – Naváděcí lopatky



[Vlastní nákres]

Obr. č.39- naváděcí plechy



[Vlastní nákres]

Mnou navržené řešení zaručuje získání rychlostního pole 4-6 [m/s] oproti rychlosti střední, navrhové, při jmenovitých provozních parametrech, což hodnotím jako optimální.

Abych správně navrhl naváděcí plechy, použil jsem program Ansys, abych viděl, jak ovlivní tok a rychlost spalin v katalyzátoru. Použil jsem turbulentní model k/epsilon a meshování typu „Multizone meshing“. Stěny jsem nastavil jako izolované a režim proudění jako nestacionární. Program využívá rovnice kontinuity a Navierovu-Stokesovu.

Rovnice kontinuity:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} = 0 \quad (83)$$

Navierova-Stokesova rovnice:

$$\rho \frac{\partial w}{\partial \tau} = \rho g - \nabla p + \nu \nabla^2 w + f_w \quad (84)$$

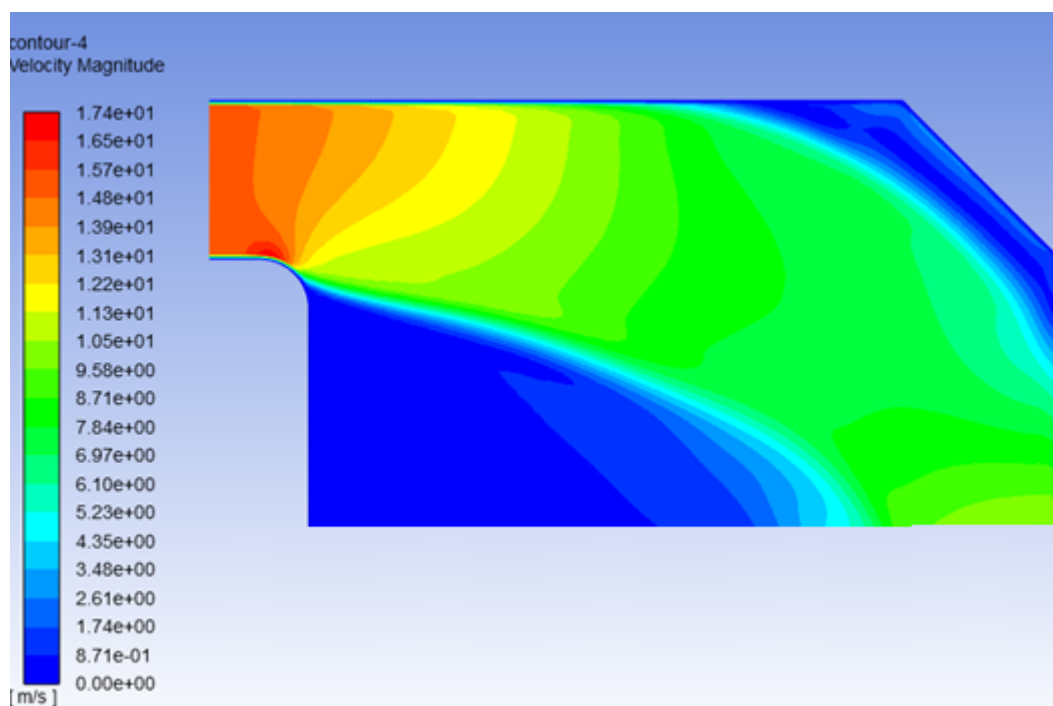
Základní okrajové podmínky jsou sepsány v následující tabulce.

Tab.č.17-Okrajové podmínky

Okrajové podmínky		
Vstupní rychlost	15	[m/s]
relativní tlak na výstupu	0	[Pa]

Pro výpočet jsem nastavil časový krok 0,001 s pro maximálně 20 iterací, kdy bylo provedeno 2000 iterací. Provedl jsem několik změn plechů, tak aby spaliny byly co nejlépe rozložené v místě katalyzátoru. Na obrázku č. 40 můžeme vidět jaké je rychlostní pole bez naváděcích plechů.

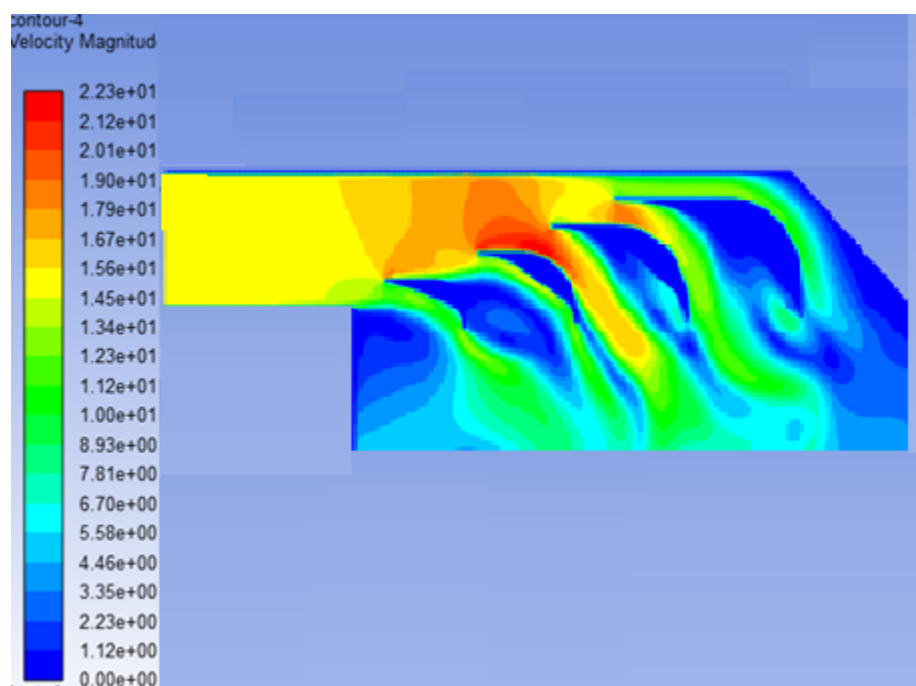
Obr.č. 40 – Rychlostní pole bez naváděcích plechů



[Vlastní nákres]

Na obrázku č. 41 je rychlostní pole, bez rovinných plechů.

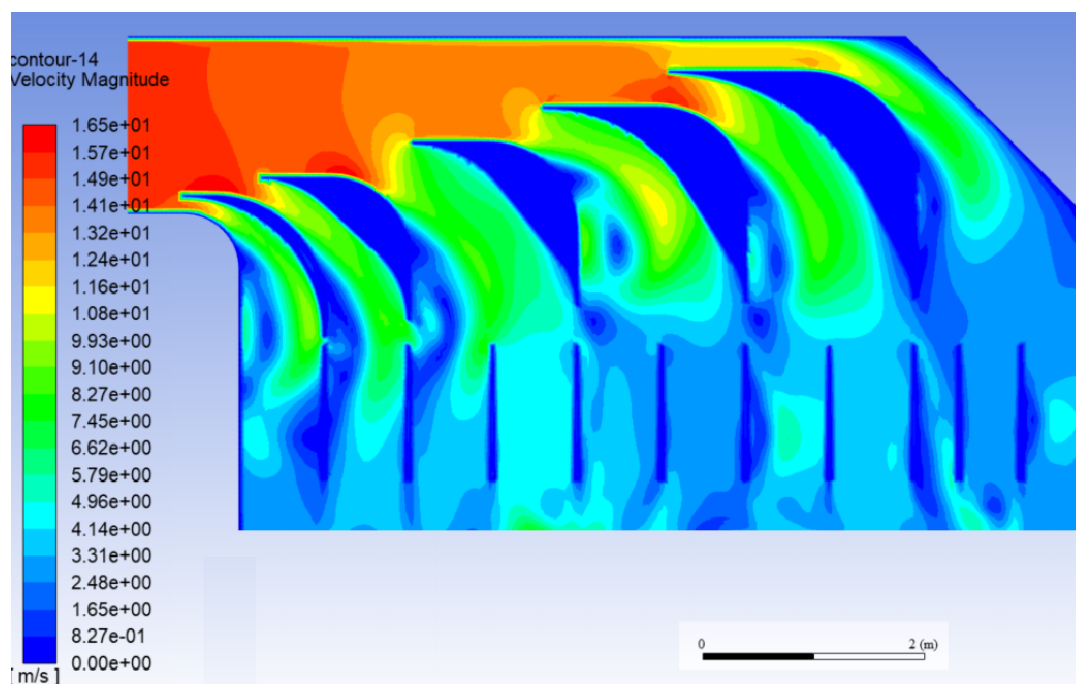
Obr. č 41- Rychlostní pole bez rovinných plechů



[Vlastní nákres]

Ideální rychlostní pole je na obrázku č.42.

Obr. č. 42 optimální rychlostní pole s prvky s 5 naváděcími plechy, a 10 rovinnými.

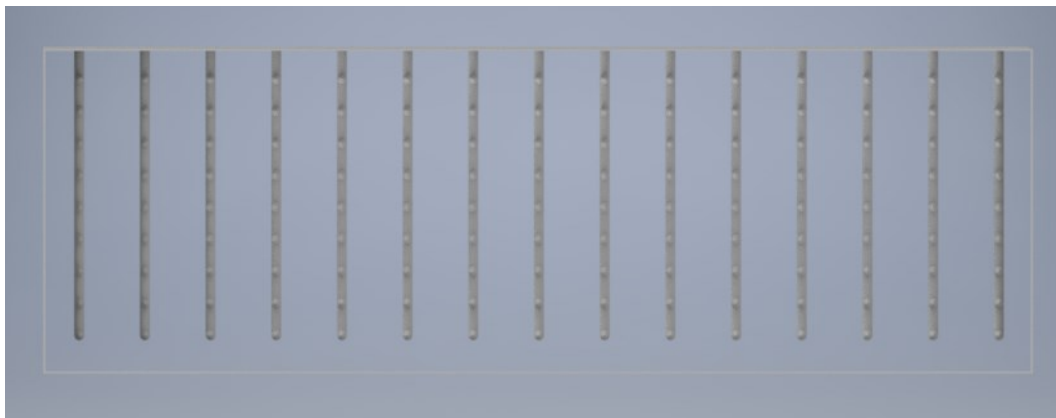


[Vlastní nákres]

9 Návrh konceptu přípravy a přívodu reagentu

S ohledem na lepší promíchání, volím nízkotlaké trysky 9 x 15 rozložené po celém spalinovém kanále viz. obrázek č. 43

Obr. č. 43- Nízkotlaké trysky

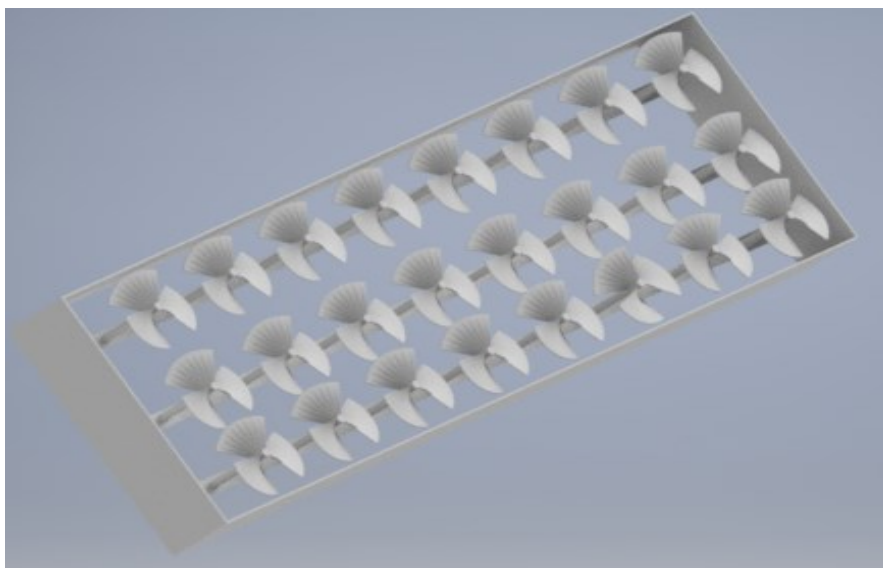


[Vlastní nákres]

Důvodem je zaručení homogenní koncentrace NH_3 ve spalínách a proto jsem navrhl i statický mixér viz. obrázek č. 44, který napomůže dokonalejšímu promíšení spalin s NH_3 .

Statický mixér je navržen tak, aby se promíchal reagent dostatečně se spalínami, zreagoval oxid dusíku s močovinou.

Obr. č. 44– Statický mixér



[Vlastní nákres]

Závěr

Diplomová práce se skládá z části teoretické, a z části praktické. Teoretická část se zabývá problematikou oxidu dusíku, od jejich vzniku po možnosti odstranění. Hlavní tématem rešerše byl přehled a popis základních způsobů odstranění NO_x pomocí primárních a sekundárních metod. Sekundárním metodám je věnována větší pozornost, především pak selektivní katalytické redukce.

Úkolem této práce a tedy části praktické, byl navrhnout koncept denitrifikačního zařízení SCR typu High dust, který se řadí právě mezi selektivní katalytické redukce. Tento návrh obsahuje ne jenom výpočet rozměrů katalyzátoru, ale i samotné řešení dopravy reagentu právě do spalín, a jejich smíchání. Takže práce obsahu návrh výměníku, pomocí kterého se ohřeje vzduchu na požadovanou teplotu, aby se pak ve směsi se vzduchem vypařila čpavková voda, který se do spalín dostane pomocí sítě trysek, které jsou před statickým mixérem, aby se spaliny s reagentem správně smíchaly. Část praktická také obsahuje návrh naváděcích prvků v toku spalín před katalytickou vrstvou a to z důvodu zaručení rovnoměrného rozložení rychlosti spalín po celé vstupní ploše katalyzátoru, což je jedna z nutných podmínek pro správný chod technologie SCR. Na tento úkol jsem využil výpočetní program Ansys. Hlavní cílem práce bylo navrhnout koncept tak, aby se množství oxidu dusíku snížilo ve spalínách na požadované množství. Návrh konceptu jednotlivých technologií je proveden pro jmenovité parametry.

Zdroje Literatura

- [1] PILAŘ, Lukáš. *Problematika legislativy EU, a koncentrace Hg ve spalínách pevných fosilních paliv* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://files.whitenergo.webnode.cz/200000340-37ec038e1e/9.%20Ing.%20Luk%C3%A1%C5%A1%20Pila%C5%99,%20Ph.D.%20-%20Problematika%20legislativy%20EU,%20a%20koncentrace%20Hg%20ve%20s palin%C3%A1ch%20pevn%C3%BDch%20fosiln%C3%ADch%20paliv.pdf>.
- [2] Nitric oxide: CHEMICAL COMPOUND. *Www.britannica.com* [online]. The Editors of Encyclopaedia Britannica [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/nitric-oxide>.
- [3] Air pollution. *Www.britannica.com* [online]. The Editors of Encyclopaedia Britannica [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/air-pollution/Fine-particulates#ref286158>.
- [4] Výzkumné energetické centrum. *Tvorba škodlivin při spalování*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2015. pdf. dostupné z: vec.vsb.cz/katalog-obrazku/clanek-115/201-tvorba-1.pdf.
- [5] Výzkumné energetické centrum. *Tvorba škodlivin při spalování*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 2015. pdf. dostupné z: vec.vsb.cz/katalog-obrazku/clanek-115/201-tvorba-1.pdf.
- [6] IBLER, Z. a kol.: *Technický průvodce energetika, BEN – technická literatura*, Praha 2002. 615s. ISBN 80-7300-026-1.
- [7] European Commission, Institute for Prospective Technological Studies (Seville): *Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants*.
- [8] Dvořák R., Chlápek P., Jecha D., Puchýř R., Stehlík P.: *New approach to common removal of dioxins and NOx as a contribution to enviromental protection*. Journal of Cleaner Production, 2010.
- [9] INTEGRATED POLLUTION PREVENTION AND CONTROL (IPPC). *Reference Document on Best Available Techniques for Large Combustion Plants* [online]. Brussels: European Commission, July 2016.
- [10] AHN, S. Y. a kol. *The charakteristic of NO production mechanism on flue gas recirculation in oxy-firing condition*. Applied Thermal Engeneering 2010. 1-9.
- [11] VISSER, B. Martien, LEVINSKY, Howard B., *External and Internal Flue Gas ecirculation: A Comparison with Respect to Flame Stability and NOx Emission*. AFRC 1996 Int Symposium Baltimore. [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z:

- <http://content.lib.utah.edu:81/cgi-bin/showfile.exe?CISOROOT=/AFRC&CISOPTR=13048&CISOMODE=print>.
- [12] ČERNÝ, Václav. *Parní kotle a spalovací zařízení: vysokošk. učebnice pro strojní fakulty*. Praha: SNTL, 1975. Řada strojírenské literatury.
 - [13] Hořák TF-DDZG [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.ohnut.cz/horak-tf-ddzg>.
 - [14] Brains in every burner. Siemens [online]. 2017. Dostupné z: <http://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/digitalization-and-software/autonomous-systems-ai-at-gasturbines.html>.
 - [15] Latest Selective Catalytic Reduction (SCR) Technologies for DeNOx Plants. Johnson Matthey: Stationary emission control [online]. 2013. Dostupné z: http://jmsec.com/Library/Releases/JMCG_SEC-EU_CMH_130919_Experts_PL_final_komprimiert.pdf.
 - [16] EPA AIR POLLUTION CONTROL COST MANUAL: Sixth edition. U.S. Environmental Protection Agency [online]. North Carolina: United States Environmental Protection Agency, EPA, 2002. Dostupné z: https://www3.epa.gov/ttncaatl1/dir1/c_allchs.pdf.
 - [17] MACHAČ, Pavel a Vlastimil FÍLA. *Co víme o NOx* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3009684/>.
 - [18] *Trwaja procedura dopuszczeniowe produktu medycznego opartego na zeolicie* [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.zeo4.info/page/3/>.
 - [19] DeNOx SCR Reactor Design Criteria: Summary. FGKH: FlueGasKnowHow [online]. Dostupné z: <http://fluegasknowhow.com/denox/scr-reactor-design-criteria>.
 - [20] Xiangtan Weida Electrical and Machinery manufacture Co. [online]. [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://www.tilemachinery.com/production-technology/coal-fired-power-plant-scrselective-catalytic-reduction-honeycomb-denitrification-catalyst/>.
 - [21] HENDERSON, Kara M., Clayton A. ERICKSON a Robert Bryan WILLIAMS. *Design of a High Removal Efficiency SCR System at Gallatin Fossil Plant Units 1 – 4* [online]. Baltimore, MD, 2014. Dostupné z: <https://www.babcockpower.com/pdf/RPI-TP-0234.pdf>.
 - [22] Schaub, G., Unruh, D., Wang, J. and Turek, T., Kinetic analysis of selective catalytic NOx reduction (SCR) in a catalytic filter. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 42, 365-371 (2003).
 - [23] Selective catalytic reduction (SCR) of NO by ammonia over V2O5/TiO2 catalyst in a

- catalytic filter medium and honeycomb reactor: A kinetic modeling study. *SciELO Brazil: Brazilian Journal of Chemical Engineering* [online]. 2015. Dostupné z: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-66322015000400875.
- [24] KOTHANDARAMAN, C.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 3rd ed. New Delhi: New Age International Pvt. Ltd., Publishers, 2006. ISBN 9788122426427.
- [25] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02591-8.